

Le coût environnemental, écologique et social de l'éthanol brésilien

par

Gabriel Emond

essai présenté au Département de biologie
en vue de l'obtention du grade de maître en écologie internationale
(maîtrise en biologie incluant un cheminement de type cours en écologie internationale)

FACULTÉ DES SCIENCES
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Sherbrooke, Québec, Canada, avril 2011

Sommaire

En 1975, le gouvernement brésilien lançait le *Proalcool*, un vaste programme national visant à accroître la production et l'utilisation d'éthanol produit à partir de la canne à sucre. À l'origine, ce programme a été mis sur pied afin d'accroître la sécurité énergétique du Brésil en réponse au premier choc pétrolier. Incidemment, le *Proalcool* est devenu un modèle de succès économique et énergétique en matière de production de biocarburant. Plus récemment, les biocarburants ont été ciblés comme un moyen de lutter contre les changements climatiques. Ainsi, de nombreux pays en voie de développement désirent imiter le modèle brésilien en produisant à grande échelle l'éthanol de canne à sucre. L'étude approfondie de la situation brésilienne démontre toutefois que la viabilité économique de la filière brésilienne dépend en partie de pratiques culturelles et industrielles insoutenables pour l'environnement, les écosystèmes et la société. Au fil du temps, l'industrie de la canne à sucre a bénéficié de l'appui et de la protection des politiciens et des lobbyistes ce qui, par conséquent, a créé un héritage de mépris envers les lois environnementales et sociales du pays. Les pratiques non durables et non équitables de l'industrie permettent à cette dernière de maintenir de faibles coûts de production d'environ 0,25 dollar américain (USD) le litre. Une évaluation économique sommaire permet d'estimer partiellement le coût environnemental, écologique et social de l'éthanol à environ 0,17 USD le litre. Le présent essai démontre aussi que l'utilisation et la production à grande échelle de biocarburants d'origine agricole comme moyen de lutte contre les changements climatiques ne semblent pas viables à long terme. Dans le modèle économique à succès du Brésil, les coûts environnementaux, écologiques et sociaux sont élevés, tandis qu'à l'échelle globale, les risques liés à la perte de biodiversité et à l'insécurité alimentaire sont considérables. Enfin, si le véritable objectif des politiques sur les biocarburants est la lutte contre les changements climatiques, les politiciens devraient à court terme concentrer leurs efforts sur l'efficacité énergétique ainsi que la conservation et la restauration des écosystèmes. À long terme, le développement de biocarburants produits à partir de ressources non vivrières pourrait faire partie de la solution.

Remerciements

Je tiens à remercier tout spécialement André Nuyt pour avoir accepté de diriger cet essai, pour ses conseils avisés et ses commentaires constructifs. Je remercie aussi la direction ainsi que les professeurs de la Maîtrise en écologie internationale pour la qualité de la formation qu'ils m'ont offerte. Mon stage au Brésil a grandement inspiré cet essai puisque cette expérience de vie a complètement changé ma vision du monde.

Je remercie tout particulièrement Marie-Claude Basque pour son aide indéfectible et ses nombreux encouragements lors des moments plus difficiles. Merci aux personnes de mon entourage, Laurie-Anne Boivin, mes parents, mes amis québécois et brésiliens, ma famille et merci à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cet essai. Enfin, merci à la mer, cette mer qui parfois est douce et tranquille, mais très souvent s'avère forte et combative, celle qui par la force de ses ondes m'a permis à maintes reprises de m'évader, de surfer, de vider mon esprit et de faire le point.

Table des matières

SOMMAIRE.....	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES.....	III
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES ACRONYMES.....	VIII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 - L'ÉTHANOL BRÉSILIEN D'HIER À AUJOURD'HUI : LES FONDEMENTS HISTORIQUES, ÉCONOMIQUES ET POLITIQUES.....	4
1.1 L'historique de la production d'éthanol au Brésil.....	4
1.1.1 La première phase du Proalcool : 1975 à 1979	6
1.1.2 La seconde phase du Proalcool : 1979 à 1986.....	7
1.1.3 La troisième phase du Proalcool : 1986 à 1990.....	8
1.1.4 La quatrième phase du Proalcool : 1990 à 2003.....	8
1.1.5 La cinquième phase du Proalcool : 2003 à aujourd'hui	9
1.2 L'héritage du Proalcool	10
1.3 La demande mondiale en gazoline et son implication pour l'éthanol brésilien	10
CHAPITRE 2 - LES COÛTS ENVIRONNEMENTAUX ET ÉCOLOGIQUES DE L'ÉTHANOL BRÉSILIEN	15
2.1 Les enjeux écologiques.....	15
2.1.1 Les biens et services écosystémiques	16
2.1.1 La biodiversité et les écosystèmes du Brésil	18

2.2	De la canne à l'éthanol	21
2.2.1	La culture de la canne à sucre.....	21
2.2.2	Le procédé industriel de production de l'éthanol	22
2.3	L'utilisation de l'eau.....	23
2.4	Le brûlage des champs de canne à sucre et la pollution de l'air	27
2.5	La mécanisation de la récolte	29
2.6	La dégradation des sols.....	31
2.7	La pollution de l'eau.....	33
2.7.1	La sédimentation	33
2.7.2	Les polluants organiques	34
2.7.3	Les produits agrochimiques.....	36
2.7.4	La dégradation des écosystèmes riverains.....	37
2.7.5	La pollution des réserves d'eaux souterraines : l'exemple de l'aquifère Guarani.....	39
2.8	L'expansion des cultures de canne à sucre et le zonage agroécologique national de la canne à sucre.....	42
2.9	Les impacts de l'expansion de la canne à sucre sur la biodiversité.....	46
2.10	Le bilan énergétique et les émissions de gaz à effet de serre de l'éthanol	49
2.10.1	Le bilan énergétique	50
2.10.2	Les émissions de gaz à effet de serre.....	51
	CHAPITRE 3 - LES COÛTS SOCIAUX DE L'ÉTHANOL BRÉSILIEN	56
3.1	L'exploitation des coupeurs de canne à sucre	56
3.1.1	Les conditions de travail.....	57
3.1.2	Le travail des enfants.....	59
3.1.3	Le salaire des coupeurs de canne à sucre	60
3.2	La santé publique : les maladies respiratoires	63
3.3	La sécurité alimentaire.....	65
3.4	Les biocarburants et les prix des denrées alimentaires.....	67
3.5	L'accès à la terre pour une meilleure sécurité alimentaire	69

CHAPITRE 4 - ANALYSE DU COÛT ENVIRONNEMENTAL, ÉCOLOGIQUE ET SOCIAL DE L'ÉTHANOL BRÉSILIEN	73
4.1 L'éthanol brésilien : vers une production certifiée.....	73
4.2 Le coût environnemental, écologique et social de l'éthanol	74
4.3 Les biocarburants, opportunités, risques et enjeux globaux.....	79
4.3.1 L'enjeu de la sécurité alimentaire.....	80
4.3.2 L'enjeu de la biodiversité : les biens et services écosystémiques	82
4.4 L'importance économique des biens et services écosystémiques	84
CONCLUSION	88
LISTE DES RÉFÉRENCES.....	91

Liste des tableaux

Tableau 1.1	Objectifs volontaires et contraignants relatifs à l'emploi de la bioénergie dans les carburants pour les transports dans les pays du G8+5 12
Tableau 1.2	Projection de production pour l'industrie du sucre et de l'alcool au Brésil .. 13
Tableau 2.1	Conservation des principaux écosystèmes du Brésil..... 18
Tableau 2.2	Données hydrographiques des huit principaux bassins versants du Brésil ...25
Tableau 2.3	Échéanciers de la législation requérant le retrait du brûlage de la canne à sucre au Brésil et proportion non brûlée dans les différentes zones 30
Tableau 2.4	Législation brésilienne en matière de bandes riveraines38

Liste des figures

Figure 2.1	Les biens et services écosystémiques	17
Figure 2.2	Localisation des six principaux biomes du Brésil	19
Figure 2.3	Processus industriel de production de l'éthanol	23
Figure 2.4	Les huit principaux bassins versants du Brésil	24
Figure 2.5	Situation géographique de l'aquifère Guarani	40
Figure 2.6	Localisation des plantations de canne à sucre par rapport aux principaux biomes du Brésil et localisation des projets d'usines de sucre et d'éthanol	45
Figure 4.1	Le coût de production de l'éthanol : scénario de production actuel (scénario 1) et scénario impliquant des mesures sociales et environnementales plus acceptables (scénario 2)	76
Figure 4.2	Évolution de la population mondiale, des terres agricoles et de la consommation par personne (1960-2005)	81

Liste des acronymes

CF	Código Florestal
COS	Carbone organique du sol
DBO	Demande biochimique en oxygène
DIEESE	Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos
EM	Évaluation des écosystèmes pour le millénaire
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
GES	Gaz à effet de serre
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
IAA	Instituto do Açúcar e do Alcool
INPE	Instituto National de Pesquisas Espaciais
OIT	Organisation internationale du travail
PBF	Programa Bolsa Família
PES	Paiement pour les services écosystémiques
PM	Particules solides en suspension
REDD-Plus	Initiatives de réduction des émissions causées par la déforestation et la dégradation des forêts
USD	Dollar américain
ZAE Cana	Zoneamento Agroecológico Nacional da Cana-de-açúcar

Introduction

En 1975, le gouvernement brésilien lançait le *Proalcool*, un vaste programme national visant à accroître la production et l'utilisation de l'éthanol comme carburant produit à base de canne à sucre. À l'époque, le principal objectif du programme était de répondre au premier choc pétrolier en réduisant la dépendance du pays aux importations de pétrole (Laluce, 1991). Ce programme, très audacieux pour l'époque, a consolidé les bases d'une industrie prospère et a hissé le Brésil au titre des leaders mondiaux en ce qui concerne la production de bioéthanol utilisé dans le domaine des transports. Ceci a été rendu possible notamment grâce aux investissements gouvernementaux et aux subventions accordées au secteur dans le cadre du *Proalcool* dans les années 70 et 80. Près de 35 ans après l'implantation de son programme sur l'éthanol, le Brésil est devenu le premier producteur de canne à sucre au monde et le principal exportateur de bioéthanol (Fischer *et al.*, 2008).

L'actuel essor de l'éthanol brésilien est dû principalement à l'intérêt grandissant que démontrent plusieurs pays envers les biocarburants liquides. Sur la scène internationale, les préoccupations croissantes concernant l'impact des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le climat, les prix élevés du pétrole et la dépendance mondiale du secteur des transports envers les combustibles dérivés du pétrole poussent de nombreux pays à diversifier leur approvisionnement énergétique et à opter pour des carburants plus respectueux de l'environnement (van den Wall Bake *et al.*, 2009).

Parmi les biocarburants, l'éthanol est celui qui attire le plus d'attention puisqu'il est déjà produit à grande échelle aux États-Unis et au Brésil et qu'il peut être facilement mélangé à la gazoline pour être ensuite utilisé dans les véhicules à essence conventionnels (Macedo *et al.*, 2008). Afin de répondre aux demandes grandissantes du marché international, le Brésil

projette de doubler les superficies consacrées à la canne à sucre et de tripler sa production d'éthanol d'ici 2020 (Amaral *et al.*, 2008).

Actuellement, l'éthanol de canne à sucre produit au Brésil est le premier biocarburant en mesure de concurrencer efficacement les carburants produits à partir des combustibles fossiles, et ce, sans subventions (FAO, 2008a). Cependant, certaines questions demeurent à savoir si cette viabilité économique ne dépend pas de pratiques et de méthodes insoutenables pour l'environnement et pour les écosystèmes. En fait, l'utilisation effrénée des ressources naturelles et la dégradation excessive de l'environnement liées à l'expansion de la canne à sucre au Brésil peuvent compromettre des services importants fournis par les écosystèmes naturels, qui connaissent déjà un degré élevé de dégradation dans le monde (Martinelli et Filoso, 2008). La question est d'autant plus importante que le Brésil est un pays riche en biodiversité et qu'il abrite des écosystèmes exceptionnels qui contribuent au bien-être des populations humaines (voir MEA, 2005).

La production à grande échelle de biocarburant soulève de nombreuses questions d'ordre social. En 2007, le Rapporteur spécial des Nations Unies sur le droit à l'alimentation, Jean Ziegler, faisait mention dans son rapport des possibles impacts négatifs des biocarburants sur le droit à l'alimentation et le risque tangible de créer une compétition entre la production d'aliments et de carburants (voir Ziegler, 2007).

Au Brésil, la culture à grande échelle de canne à sucre pour la production d'éthanol est associée à de nombreux problèmes sociaux. L'exploitation des travailleurs (Rocha *et al.*, 2007; Martinelli et Filoso 2008; Alves, 2006), les problèmes de santé publique liés au brûlage des champs (Uriarte *et al.*, 2009; Mazzoli-Rocha *et al.*, 2008; Cançado *et al.*, 2006; Arbex *et al.*, 2007) et une réduction de l'accès à la terre pour les pauvres (Peskett *et al.*, 2007; Smeets *et al.*, 2006) sont les principaux enjeux sociaux mis en évidence dans les études scientifiques récentes. Si les problèmes environnementaux et sociaux liés à l'industrie de la canne à sucre

persistent dans le futur, les effets négatifs risquent de se faire ressentir sur l'ensemble de la société brésilienne et plus particulièrement sur les plus pauvres (Martinelli et Filoso, 2008).

L'objectif du présent essai est d'évaluer les divers coûts environnementaux, écologiques et sociaux liés à la production d'éthanol et à l'expansion des cultures de canne à sucre au Brésil. Il est important de souligner que le présent essai n'expose pas une analyse économique exhaustive de la situation brésilienne. Cet ouvrage se veut plutôt un outil de discussion scientifique où l'exemple du Brésil est utilisé pour faire prendre conscience des incertitudes et questions que soulève la production à grande échelle de biocarburants dans les pays du sud. En fait, comme le soulignent Uriarte *et al.* (2009), la position unique qu'occupe le Brésil sur le marché des biocarburants et la disponibilité de données sociales et environnementales procurent une occasion unique d'évaluer les conséquences de la production de masse de biocarburants, et ce, à la lumière de l'intérêt mondial croissant pour les biocarburants.

Afin de répondre au mieux à l'objectif fixé, le présent essai est divisé en quatre chapitres et est structuré comme suit. Tout d'abord, les fondements historiques, politiques et économiques sur lesquelles s'est édifiée l'industrie brésilienne du bioéthanol seront abordés au chapitre 1. Ensuite, le chapitre 2 révisera les différents impacts environnementaux (utilisation de l'eau, érosion des sols, et pollution de l'eau et de l'air) et écologiques (dégradation des écosystèmes et perte de biodiversité) de la production d'éthanol au Brésil. Les principaux impacts sociaux seront par la suite explorés au chapitre 3. Finalement, une analyse de la viabilité à long terme des biocarburants liquides actuels est proposée au chapitre 4. Cette analyse sera effectuée à la lumière des divers coûts environnementaux, écologiques et sociaux associés à la production d'éthanol du Brésil.

Chapitre 1

L'éthanol brésilien d'hier à aujourd'hui : les fondements historiques, économiques et politiques

Répondre à une demande en combustible fossile toujours grandissante tout en limitant les émissions de gaz à effet serre dans l'atmosphère, voici un défi colossal auquel fait face actuellement la communauté internationale. Afin de relever ce défi, de nombreux pays ont choisi de se tourner vers la production et l'utilisation de biocarburants liquides dans le secteur des transports. Les deux principaux types de biocarburants liquides sont l'éthanol et le biodiésel, qui sont produits essentiellement à partir de cultures vivrières. L'éthanol remplace l'essence alors que le biodiésel sert de substitut au diésel. En 2007, approximativement 62 milliards de litres de biocarburant ont été produits mondialement, ce qui a permis de combler 2 % de la demande mondiale en combustible fossile dans le secteur des transports (OESO, 2008 cité dans Zuurbier et van de Vooren, 2008). Pour la même année, l'éthanol a représenté 85 % de la production mondiale de biocarburants liquides (FAO, 2008a). Les deux principaux pays producteurs de bioéthanol sont les États-Unis et le Brésil qui le produisent respectivement à partir de maïs et de canne à sucre (Goldemberg *et al.*, 2008). Cependant, à l'heure actuelle, seules les industries brésiliennes, qui produisent l'éthanol à partir de la canne à sucre, sont en mesure de produire un biocarburant compétitif à faible coût. Ceci est en partie dû au fait que le Brésil possède une longue expérience en ce qui concerne la culture de la canne à sucre et la production et l'utilisation d'éthanol comme carburant automobile.

1.1 L'historique de la production d'éthanol au Brésil

Depuis l'époque de la colonisation, la canne à sucre joue un important rôle économique au Brésil (Leite *et al.*, 2009). L'éthanol dérivé de la canne à sucre est utilisé comme carburant au

pays depuis le début du XX^{ème} siècle (Moreira et Goldemberg, 1999). Ce fut lors du premier Congrès national sur l'application industrielle de l'alcool en 1903 que furent proposées pour la première fois des mesures visant à promouvoir la production et l'utilisation de ce carburant. En 1923, le Brésil produisait annuellement déjà près de 150 millions de litres d'éthanol (Moreira et Goldemberg, 1999). De surcroît, en 1931, un décret fédéral imposa que 5 % d'éthanol soit mélangé à l'essence (Leite *et al.*, 2009). En 1933, le gouvernement fédéral créa l'Institut du sucre et de l'alcool (IAA du portugais *Instituto do Açúcar e do Alcool*). Cette institution avait comme but d'établir les règles contrôlant l'industrie du sucre et de l'alcool au Brésil (Matsuoka *et al.*, 2009). Au début des années quarante, la production d'éthanol avait atteint 650 millions de litres au Brésil (Moreira et Goldemberg, 1999). Toutefois, il aura fallu attendre 1975 avant que le Brésil ne mette en place le *Proalcool*, un véritable programme gouvernemental sur la production et l'utilisation de bioéthanol.

En 1973, la guerre du Kippour, un conflit entre l'Égypte, la Syrie et Israël, occasionna de graves perturbations dans les relations internationales. Suite à ces événements les pays exportateurs de pétrole du monde arabe décidèrent d'imposer un embargo sur les exportations de pétrole. La principale conséquence de l'embargo a été la hausse marquée du prix du pétrole, déclenchant une véritable crise internationale, mieux connue sous le nom du premier choc pétrolier (Michellon *et al.*, 2008). Avant 1973, le prix mondial du pétrole fluctuait entre deux et trois dollars américains le baril, alors qu'en 1974 suite au premier choc pétrolier, le prix du baril de pétrole quintupla, passant de deux à dix dollars américains le baril (Rask, 1995). La hausse importante des prix incita de nombreux pays à réduire leur dépendance envers le pétrole. Pour sa part, le Brésil prit la décision ambitieuse d'encourager la production de l'éthanol comme carburant automobile. En ce sens, le gouvernement brésilien lança en 1975 le *Proalcool*, un vaste programme national visant à accroître la production et l'utilisation de l'éthanol-carburant produit principalement à base de canne à sucre. Depuis son instauration dans les années soixante-dix, le *Proalcool* a connu plusieurs phases de succès et de popularité (résumé dans Matsuoka *et al.*, 2009). Dans la littérature, on reconnaît généralement cinq

phases distinctes au *Proalcool*, toutes caractérisées par des événements historiques propres qui ont modulé dans le temps la production et l'utilisation d'éthanol au Brésil.

1.1.1 La première phase du Proalcool : 1975 à 1979

Dans les années soixante-dix, le Brésil était fortement dépendant envers le pétrole étranger, important plus de 80 % de ses besoins en pétrole (Leite *et al.*, 2009). La hausse marquée du prix du pétrole de 1973 se refléta négativement dans la balance des paiements du pays et engendra une grave pression inflationniste (Fracaro, 2005 cité dans Michellon *et al.*, 2008). En 1974, les importations de pétrole représentaient 32,2 % des dépenses totales en importation du pays, comparativement à 9,7 % pour le même volume importé l'année précédente (Leite *et al.*, 2009). Par ailleurs, les besoins énergétiques de l'époque se combinaient avec une mauvaise conjoncture du marché du sucre (Leite *et al.*, 2009; Matsuoka *et al.*, 2009; Moreira et Goldemberg, 1999). Ainsi, l'idée d'encourager la production de carburant à base de canne à sucre permettait non seulement de réduire la dépendance nationale aux importations de pétrole, mais procurait aussi de nouveaux débouchés économiques aux producteurs de canne à sucre.

Les principaux objectifs du *Proalcool* étaient donc de réduire la dépendance nationale aux importations de pétrole, d'économiser des devises étrangères et de permettre le développement national par la création de nouveaux emplois ainsi que l'élaboration d'une expertise en matière de production d'éthanol (Michellon *et al.*, 2008). Grâce à l'aide du gouvernement qui fournissait le financement et les subventions au secteur, la production d'éthanol a pris rapidement de l'ampleur (Michellon *et al.*, 2008). La production était principalement réalisée dans des distilleries annexées aux usines de sucre construites grâce à l'aide financière du gouvernement. La première phase du programme a été marquée principalement par la production d'éthanol anhydre, un carburant destiné à être mélangé à la gazoline. Durant cette période, la gazoline vendue au pays pouvait contenir jusqu'à 25 % d'éthanol anhydre. Dans

ces proportions, le mélange éthanol anhydre-gazoline peut être utilisé dans les voitures à essence conventionnelle. Ainsi, la production de l'éthanol anhydre est passée de 220 millions de litres en 1975 à 2,8 milliards de litres en 1979 (Leite *et al.*, 2009).

Finalement, c'est dans cette même période que le gouvernement nomma la compagnie pétrolière d'état *Petrobras* responsable de l'achat, du transport, de l'entreposage et de la distribution de l'éthanol (Michellon *et al.*, 2008). À l'époque, c'est le gouvernement qui se chargeait de fixer le prix de vente de l'éthanol.

1.1.2 La seconde phase du Proalcool : 1979 à 1986

En 1979, survient un nouveau conflit, cette fois-ci au Moyen-Orient et impliquant l'Iran et l'Irak. Ce conflit mena à un deuxième choc pétrolier qui marqua la seconde phase du *Proalcool* (Michellon *et al.*, 2008). Une fois de plus, le prix du baril de pétrole bondit, passant de 25 USD en 1979 à 30 USD en 1981 (Leite *et al.*, 2009). Définitivement, ces événements augmentèrent l'intérêt national pour l'éthanol. La seconde phase du *Proalcool* a été marquée par la construction de nombreuses distilleries autonomes subventionnées par l'état et par la production massive d'éthanol de type hydraté (Rosillo-Calle et Cortez, 1998). Contrairement à l'alcool anhydre qui est destiné à être mélangé à la gazoline, l'alcool hydraté est voué à remplacer la gazoline. C'est aussi dans cette période que les Brésiliens ont vu apparaître sur le marché les premières automobiles à l'alcool, des véhicules fonctionnant exclusivement à l'éthanol hydraté. La population brésilienne répondit de façon positive à l'arrivée massive sur le marché de l'éthanol hydraté et des voitures fonctionnant à l'alcool. Entre 1983 et 1988, les véhicules fonctionnant uniquement à l'éthanol représentaient en moyenne 90 % des voitures neuves vendues au pays (Rosillo-Calle et Cortez, 1998). En 1988, approximativement 3,6 à 4 millions de véhicules roulaient essentiellement à l'éthanol, ce qui représentait pour l'époque environ 30 % du parc automobile brésilien (Laluce, 1991).

1.1.3 La troisième phase du Proalcool : 1986 à 1990

La troisième phase du *Proalcool* est connue comme étant une période de décélération du programme. Vers la moitié des années 1980, le Brésil a fait face à une réalité économique de plus en plus difficile causée par la dégradation des conditions économiques et sociales du pays (Rosillo-Calle et Cortez, 1998). Par conséquent, il y a eu une réduction notable des investissements du gouvernement dans le programme à partir de 1984 (Rosillo-Calle et Cortez, 1998). De plus, dans la même période, le prix du pétrole se stabilisa à la baisse passant d'une fourchette de 30 à 40 USD le baril à une fourchette de 12 à 20 USD (Michellon *et al.*, 2008). La baisse des investissements du gouvernement dans la filière de l'éthanol poussa les industriels à délaisser la production de l'éthanol au profit de la production de sucre, qui devint très lucrative puisque le marché international du sucre était en forte remontée (Michellon *et al.*, 2008). Le choix en faveur du sucre et le désengagement du gouvernement envers le programme a fait que la production d'éthanol est devenue insuffisante par rapport à la demande nationale toujours grandissante. En 1989, il s'est produit une véritable crise de ravitaillement de l'éthanol qui a abouti à la perte de confiance des Brésiliens à l'égard du carburant (Leite *et al.*, 2009). Il s'ensuivit un effondrement de la vente des automobiles à alcool. Dans cette période, les ventes de ces véhicules sont passées de 88 % des ventes totales de voitures en 1988 à moins de 3 % en 1995 (Rosillo-Calle et Cortez, 1998).

1.1.4 La quatrième phase du Proalcool : 1990 à 2003

Malgré tous les problèmes rencontrés lors de la troisième phase, la filière de l'alcool fit tout de même son chemin. Bénéficiant d'une expertise dans la culture de la canne et dans la production de l'éthanol, les industriels ont été en mesure de produire l'éthanol de façon rentable sans l'aide financière du gouvernement. La quatrième phase du *Proalcool* a été marquée par la dérèglementation du secteur du sucre et de l'alcool. En 1990, l'IAA, l'institut grâce auquel le gouvernement brésilien intervenait dans le secteur du sucre et de l'alcool

depuis 60 ans, a été formellement supprimé (Martines-Filho *et al.*, 2006). En 1997, le prix de l'éthanol hydraté a été libéralisé, suivi en 1999 par la libéralisation du prix de l'éthanol anhydre (Martines-Filho *et al.*, 2006). En 1999, toute la réglementation gouvernementale régissant l'industrie de l'éthanol a été retirée (Nass *et al.*, 2007). Encore aujourd'hui, il n'existe pas de restrictions sur la production d'éthanol au Brésil et le gouvernement ne fournit plus d'aide financière aux producteurs. Le gouvernement contrôle uniquement le pourcentage maximal d'éthanol anhydre qui peut être mélangé à la gazoline (oscillant entre 20 et 26 %). Actuellement, il s'agit du seul outil qu'utilise le gouvernement brésilien pour équilibrer la relation entre l'offre et la demande d'éthanol. Au début des années 2000, le prix du pétrole s'est remis à grimper rendant de nouveau profitable et concurrentielle la production d'éthanol (Nass *et al.*, 2007). Ainsi, l'intérêt envers les voitures à l'éthanol a été renouvelé sans toutefois surpasser celui pour les voitures à essence.

1.1.5 La cinquième phase du Proalcool : 2003 à aujourd'hui

La cinquième phase du *Proalcool* est caractérisée principalement par la sortie en 2003 de la première voiture *flex-fuel*, un véhicule pouvant fonctionner en utilisant tout type de carburant (gazoline pure, mélanges éthanol-gazoline et éthanol hydraté). L'introduction de ce type de véhicules a été motivée entre autres par les prix élevés du pétrole (Leite *et al.*, 2009). Avec ce type de voiture, les automobilistes brésiliens sont en mesure de choisir parmi les différents carburants offerts selon leur disponibilité, leur prix et leur performance (Nass *et al.*, 2007). Le succès des voitures *flex-fuel* au Brésil est incontesté. La sortie de cette nouvelle technologie a fait littéralement renaître l'intérêt et la confiance des Brésiliens envers l'éthanol. En 2007, les véhicules *flex-fuel* ont représenté 86 % des nouvelles voitures vendues au Brésil (ANFAVEA, 2008 cité dans Leite *et al.*, 2009). En mars 2008, la consommation d'éthanol au Brésil a dépassé celle de la gazoline, et ce, grâce en grande partie à la popularité des voitures *flex-fuel* (Faaij *et al.*, 2008).

1.2 L'héritage du Proalcool

Durant les cinq phases du *Proalcool*, les superficies agricoles consacrées à la canne à sucre ont doublé passant de 3,5 millions d'hectares à près de 7 millions d'hectares (IBGE, 2009 cité dans Matsuoka *et al.*, 2009). En plus de l'augmentation des terres agricoles consacrées à la canne à sucre, la productivité des cannaies a aussi connu une augmentation substantielle au cours du *Proalcool*. En 1960, la productivité était de 45 tonnes/ha tandis qu'aujourd'hui elle atteint les 75 tonnes/ha (Martinelli et Filoso, 2008). Cette augmentation de productivité est due principalement à l'utilisation de meilleures techniques agricoles et à un important programme de sélection génétique des semences mis en place par le gouvernement brésilien dans les décennies 70 et 80 (résumé dans Martinelli et Filoso, 2008). De plus, la canne à sucre cultivée au Brésil est la culture énergétique qui offre le meilleur rendement (FAO, 2008a). En plus d'avoir une productivité à l'hectare élevée, la haute teneur en sucre de la canne permet d'obtenir près de 5 500 litres d'éthanol par hectare récolté (FAO, 2008a). Près de 35 ans après l'implantation de son programme sur l'éthanol, le Brésil est devenu le premier producteur de canne à sucre au monde et le principal exportateur de bioéthanol (Fischer *et al.*, 2008). Pour la saison des récoltes 2007-2008, approximativement 493 millions de tonnes de canne à sucre ont été récoltées, dont environ la moitié a servi à produire 22,5 milliards de litres d'éthanol (Amaral *et al.*, 2008).

1.3 La demande mondiale en gazoline et son implication pour l'éthanol brésilien

Une grande partie de la demande mondiale d'énergie est fournie par le pétrole et est utilisée dans le domaine des transports. La plupart des experts acceptent le fait que le transport individuel continuera à jouer un rôle clé dans le futur et que le pétrole continuera d'être la principale source d'énergie pour les décennies à venir (Walter *et al.*, 2008). Pour l'année 2007, il a été estimé que 61,2 % de la consommation annuelle de pétrole a été utilisée dans le secteur

des transports (IEA, 2009). Pour la même année, ce secteur a été responsable de près du quart du gaz carbonique émis globalement par les combustibles fossiles (IEA, 2009).

Les préoccupations grandissantes concernant l'extrême volatilité des prix du pétrole et les changements climatiques poussent les pays à opter pour des sources d'énergie alternatives aux combustibles fossiles. Récemment, les biocarburants liquides ont été ciblés comme étant une solution à court terme pour répondre en partie de la demande mondiale en combustible fossile (Zuurbier et van de Vooren, 2008) et pour faire face aux changements climatiques. Ainsi, de nombreux pays se sont fixé des objectifs volontaires et obligatoires d'incorporation de biocarburants dans les combustibles automobiles. Le tableau 1.1 expose les divers objectifs fixés par les pays du G8+5 concernant l'utilisation des biocarburants dans le transport. Parmi les biocarburants disponibles, l'éthanol est celui qui attire le plus d'attention puisqu'il est déjà produit à grande échelle aux États-Unis et au Brésil et qu'il peut être facilement mélangé à la gazoline pour être ensuite utilisé dans les véhicules à essence conventionnelle (Macedo *et al.*, 2008).

Sur les marchés internationaux, l'éthanol produit à base de canne à sucre au Brésil semble être le biocarburant le plus prometteur. Actuellement, les producteurs brésiliens possèdent les seules industries en mesure de produire à grande échelle un biocarburant sans subvention et mesure de soutien provenant des gouvernements. Ce succès économique sans pareil est dû en grande partie à l'expertise acquise lors des nombreuses années du *Proalcool*. En fait, le Brésil dispose d'un éventail de conditions agricoles et climatiques qui favorisent la production d'éthanol bon marché à faible coût. De plus, grâce à sa grande disponibilité en terres cultivables, son expertise et sa disponibilité en main-d'œuvre bon marché, le Brésil est le seul pays au monde possédant les conditions idéales pour accroître efficacement et rapidement sa production d'éthanol (Walter *et al.*, 2008). À l'origine, le *Proalcool* a été créé pour répondre aux prix élevés du pétrole et pour réduire la dépendance du Brésil envers les importations de

pétroles, mais le programme est devenu incidemment un modèle de succès économique en matière de production de biocarburant (révisé dans Matsuoka *et al.*, 2009).

Tableau 1.1 Objectifs volontaires et contraignants relatifs à l'emploi de la bioénergie dans les carburants pour les transports dans les pays du G8+5

PAYS/REGROUPEMENT DE PAYS	OBJECTIFS ¹
Brésil	Proportion contraignante de 20-25 pour cent d'éthanol anhydre mélangé au pétrole; de 3 pour cent au moins de biodiesel mélangé au diesel à compter de juillet 2008 et de 5 pour cent (B5) d'ici la fin 2010
Canada	5 pour cent d'énergie renouvelable dans le pétrole d'ici 2010 et 2 pour cent dans les carburants diesel d'ici 2012
Chine	15 pour cent de biocarburants dans la consommation totale d'énergie pour le transport d'ici 2020
France	5,75 pour cent d'ici 2008, 7 pour cent d'ici 2010, 10 pour cent d'ici 2015 (V), 10 pour cent d'ici 2020 (M = objectif UE)
Allemagne	6,75 pour cent d'ici 2010, devant passer à autre 8 pour cent d'ici 2015, 10 pour cent d'ici 2020 (M = objectif UE)
Inde	Proportion contraignante envisagée de 5-10 pour cent d'éthanol et 20 pour cent de biodiesel
Italie	5,75 pour cent d'ici 2010 (M), 10 pour cent d'ici 2020 (M = objectif UE)
Japon	500 000 kilolitres, selon conversion en pétrole brut, d'ici 2010 (V)
Mexique	Objectifs en cours de détermination
Fédération de Russie	Pas d'objectifs
Afrique du Sud	Jusqu'à 8 pour cent d'ici 2006 (V) (10 pour cent objectif en cours d'examen)
Royaume-Uni	5 pour cent de biocarburants d'ici 2010 (M), 10 pour cent d'ici 2020 (M = objectif UE)
États-Unis d'Amérique	9 milliards de gallons devant provenir de biocarburants avancés d'ici 2008, chiffre devant passer à 36 milliards d'ici 2022 (M). Sur les 36 milliards de gallons, 21 devant provenir de biocarburants avancés (dont 16 milliards provenant de biocarburants cellulose)
Union européenne	10 pour cent d'ici 2020 (M. Proposé par la Commission européenne en janvier 2008)

¹ M = contraignants; V = volontaires.

Sources: GBEP, 2007, mis à jour à partir des données provenant du Département de l'agriculture des États-Unis (USDA, 2008a); de l'Association des producteurs américains d'éthanol (Renewable Fuels Association, 2008); de la communication écrite de la Commission européenne, ainsi que du Professeur Ricardo Abramovay, Université de São Paulo, Brésil.

Source : FAO (2008a). p. 33

Actuellement, environ 84 % de la production brésilienne est utilisée par le marché intérieur alors que les 16 % restants sont exportés (Leite *et al.*, 2009). Afin de répondre à la demande intérieure et extérieure grandissante, le secteur prévoit doubler les superficies agricoles consacrées à la canne à sucre d'ici 2020. De nombreuses usines sont actuellement en

construction sur le territoire brésilien et il est prévu que la production d'éthanol doublera d'ici 2015 (Walter *et al.*, 2008). Le tableau 1.2 expose les détails de la production de la saison 2007-2008 ainsi que les prévisions de production du secteur du sucre et de l'alcool pour les saisons 2015-2016 et 2020-2021.

Tableau 1.2 Projection de production pour l'industrie du sucre et de l'alcool au Brésil

	2007/2008	2015/2016	2020/2021
Production de canne à sucre (million de tonnes)	493	829	1 038
Superficie (million d'hectares)	7,8	11,4	13,9
Sucre (million de tonnes)	30,8	41,3	45
Marché interne	12,2	11,4	12,1
Exportation	18,6	29,9	32,9
Éthanol (milliard de litres)	22,5	46,9	65,3
Marché interne	18,9	34,6	49,6
Exportation	3,6	12,3	15,7
Bioélectricité (gigawatt)	1,8	11,5	14,4

Traduction libre

Source : Amaral, W.A.N., Marinho, J.P., Tarasantchi, R., Beber A. et Giuliani, E. (2008). p.

116

En 2005, le gouvernement brésilien a mandaté une étude sur la possibilité que l'éthanol de canne à sucre puisse remplacer 5 % de la demande mondiale de gazoline à l'horizon de 2025 (Leite *et al.*, 2009). La consommation globale de gazoline a été estimée à 1,2 trillion de litres pour l'année 2005 et elle pourrait augmenter de 46 % d'ici 2025, pour atteindre 1,7 trillion de litres (résumé dans Leite *et al.*, 2009). D'un autre côté, pour accéder à son objectif de remplacer 5 % de la demande mondiale en gazoline, le Brésil devra produire 102 milliards de litres en 2025 (Leite *et al.*, 2009). Afin d'atteindre ce niveau élevé de production, le secteur devra largement surpasser ses prédictions (voir tableau 1.2) et presque quintupler sa production d'éthanol par rapport à l'année 2008. Pour atteindre cet objectif, la canne à sucre

devra couvrir environ 21 millions d'hectares ce qui permettrait de produire en théorie 102 milliards de litres d'éthanol (Leite *et al.*, 2009).

Enfin, l'actuelle expansion de la production d'éthanol n'est pas exemptée de critiques autant au Brésil qu'à l'international, et ce, à cause des nombreuses inquiétudes sociales et environnementales liées à la monoculture de la canne à sucre (utilisation de l'eau, impacts sur l'environnement et sur la biodiversité, conditions de travail, concentration de la terre, etc.). Récemment, ces inquiétudes ont mené à de nombreuses études évaluant certains des impacts environnementaux, écologiques et sociaux de la production d'éthanol (voir Smeets *et al.*, 2008; Uriarte *et al.*, 2009; Martinelli et Filoso, 2008; Rodrigues et Ortiz, 2006). Malgré les multiples études publiées jusqu'à maintenant sur le sujet, une comptabilisation complète des coûts sociaux et environnementaux de la production d'éthanol fait encore défaut (Uriarte *et al.*, 2009). Diverses incertitudes planent encore sur la production et l'utilisation de biocarburants à grande échelle. La position unique qu'occupe actuellement le Brésil sur le marché des biocarburants procure une occasion unique d'évaluer les conséquences de la production de masse de biocarburants, et ce, à la lumière de l'intérêt mondial croissant pour les biocarburants (Uriarte *et al.*, 2009).

Chapitre 2

Les coûts environnementaux et écologiques de l'éthanol brésilien

D'un point de vue strictement économique et énergétique, l'industrie brésilienne de l'éthanol est souvent citée comme un exemple de succès et de viabilité. À l'heure actuelle, les distilleries brésiennes sont parmi les seules industries de biocarburant en mesure de produire un combustible à grande échelle sans support financier provenant des gouvernements. Comme il a été exposé au chapitre 1, le succès économique de l'éthanol brésilien est en partie attribuable à l'expertise acquise par l'industrie lors des nombreuses années du *Proalcool*. Cependant, certaines questions demeurent, à savoir si cette viabilité économique ne dépend pas aussi de pratiques et de méthodes insoutenables pour l'environnement et pour les écosystèmes. En fait, il ne faut pas perdre de vue que la production à grande échelle d'agrocarburants est issue d'une agriculture intensive et de procédés industriels qui exercent une pression notable sur l'environnement. La question est d'autant plus importante puisque le Brésil est un pays riche en biodiversité qui abrite des écosystèmes exceptionnels qui contribuent au maintien d'un environnement de qualité. De plus, ces milieux naturels jouent un rôle écologique important en procurant une multitude de biens et services aux populations humaines (voir MEA, 2005). Certains écosystèmes du Brésil comme le cerrado et la forêt atlantique sont fortement menacés et sont considérés comme des « points chauds » de la biodiversité mondiale.

2.1 Les enjeux écologiques

En 2000, dans son rapport à l'assemblée générale de l'Organisation des Nations Unies, le Secrétaire général de l'époque, Kofi Annan, réclamait l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (EM), une vaste étude scientifique ayant pour objectif d'évaluer les conséquences

des changements écosystémiques sur le bien-être humain (voir MEA, 2005). En 2005, le rapport de synthèse de l'EM a été rendu public. Il stipule qu'au cours des cinquante dernières années, l'homme a modifié les écosystèmes plus rapidement et plus profondément que durant toute autre période comparable de l'histoire de l'humanité, en grande partie pour satisfaire une demande toujours plus grande en matière de nourriture, d'eau douce, de bois, de fibre et d'énergie (MEA, 2005). L'EM rappelle que tout le monde sur terre dépend de la nature et des services rendus par les écosystèmes pour mener une vie décente, en bonne santé et en sécurité (MEA, 2005). En ce sens, la conservation et le maintien de la diversité biologique s'avèrent être d'une importance capitale pour l'humanité.

2.1.1 Les biens et services écosystémiques

La biodiversité est à la base des fonctions des écosystèmes (SCDB, 2006). En retour, les fonctions des écosystèmes procurent aux populations humaines d'innombrables bienfaits sous forme de biens et de services écosystémiques. Les biens écosystémiques représentent les éléments matériels fournis par les écosystèmes alors que les services sont d'ordre divers : services culturels, services de régulation et services d'appui. Les services de régulation correspondent aux fonctions indispensables remplies par les écosystèmes et auxquelles une valeur économique est rarement accordée. Ces services comprennent entre autres la régulation du climat grâce au stockage du carbone et au contrôle des précipitations à un niveau régional, le retraitement des polluants grâce à une filtration de l'air et de l'eau, ainsi que la protection contre les catastrophes naturelles (SCDB, 2010). En ce qui concerne les services culturels, ils ne procurent pas d'avantages matériels directs. Ces services comprennent la valeur spirituelle, éducative, récréative et esthétique accordée aux écosystèmes. Enfin, les services d'appui ne procurent aucun avantage direct aux sociétés humaines, mais ils sont essentiels au fonctionnement des écosystèmes et constituent donc, indirectement, la source de tous les autres services (SCDB, 2010). La figure 2.1 expose les différents biens et services écosystémiques.

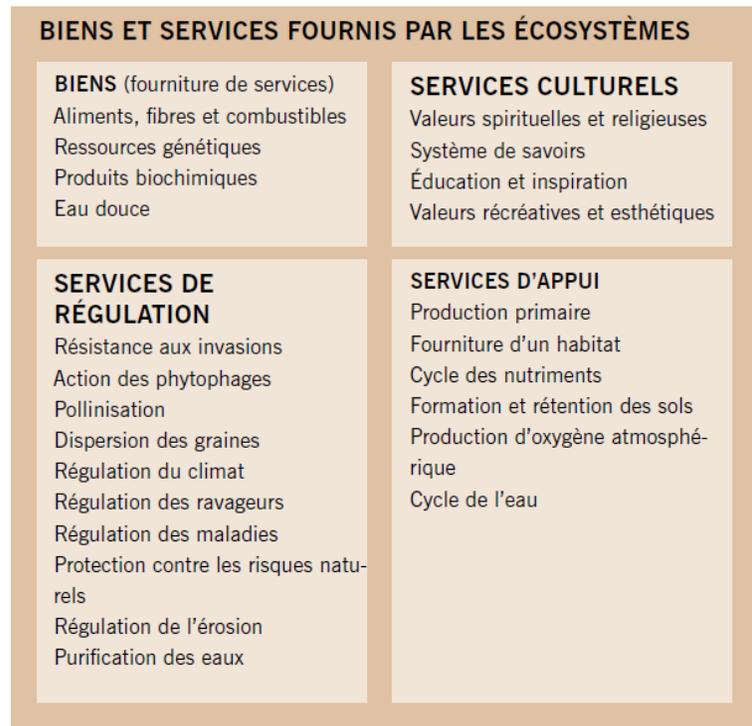


Figure 2.1 Les biens et services écosystémiques

Source : SCDB (2006). p. 14

Des études ont démontré que la destruction des écosystèmes du Brésil peut mener à la dégradation de certains services écosystémiques de régulation comme le stockage du carbone (Fargione *et al.*, 2008; Lapola *et al.*, 2010) et le contrôle des précipitations à un niveau local (LBA, 2008 cité dans Alho, 2008b; Webb *et al.*, 2005). Les recherches du *Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia* (LBA, 2008 cité dans Alho, 2008b) ont démontré l'importance de la forêt amazonienne dans la régulation du climat mondial et pour le contrôle des précipitations à l'échelle régionale. Le couvert forestier contribue au maintien de la pluie par le recyclage de la vapeur d'eau à un rythme soutenu dans l'atmosphère (LBA, 2008 cité dans Alho, 2008b). Les récents modèles concluent que la déforestation à grande échelle en milieu tropical pourrait entraîner une augmentation des températures globales (de 1 à 2°C et ce, indépendamment du phénomène des changements climatiques) et une diminution des précipitations annuelles (révisé dans Webb *et al.*, 2005).

2.1.1 La biodiversité et les écosystèmes du Brésil

Les écosystèmes du Brésil abritent entre 15 % et 20 % de la diversité biologique du monde et le plus grand nombre d'espèces endémiques à l'échelle globale (CDB, 2010). Les principaux biomes du Brésil sont la forêt atlantique, le cerrado, le pantanal, la forêt amazonienne, la pampa et la caatinga. Au fil du temps, les écosystèmes du Brésil ont subi de fortes pressions anthropiques qui ont conduit à une réduction notable de leurs superficies d'origine. À titre d'exemple, des milieux comme le cerrado et la forêt atlantique sont considérés comme des « points chauds » de la biodiversité mondiale puisqu'ils abritent une quantité exceptionnelle d'espèces endémiques, mais qu'ils subissent en contrepartie une importante perte d'habitats (Myers *et al*, 2000). Un autre exemple provient de l'Amazonie brésilienne, une immense forêt tropicale humide qui a perdu plus de 17 % de son couvert forestier initial (SCDB, 2010). Le tableau 2.1 précise l'état de conservation des principaux biomes du pays et la figure 2.2 permet de localiser ces biomes sur le territoire brésilien. Parmi les biomes du Brésil, le cerrado, la forêt atlantique, la forêt amazonienne et le pantanal sont les quatre milieux les plus concernés par l'expansion présente et passée des cultures de canne à sucre. Voici une brève description de ces écosystèmes et des sources principales de dégradations de ces milieux.

Tableau 2.1 Conservation des principaux écosystèmes du Brésil

Biome	Superficie originale (% du pays)	Superficie actuelle (% de la superficie originale)	Aires protégées (% de la superficie originale)
forêt amazonienne	49	85	4,8
cerrado	23	20	1,7
forêt atlantique	13	7	0,7
caatinga	10	3,2	0,7
pampa	2	2	0,3
pantanal	1,8	inconnue	0,6

Traduction libre

Source : Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A. et Dolzan, P. (2006). p. 34

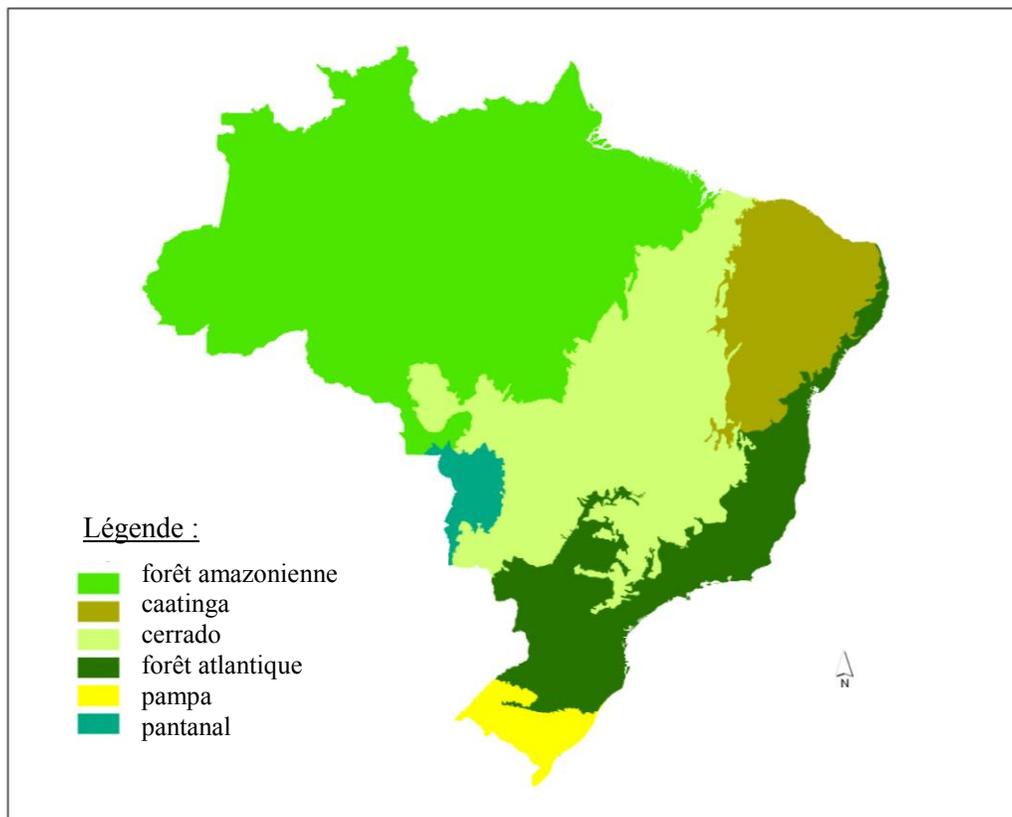


Figure 2.2 Localisation des six principaux biomes du Brésil

Traduction libre

Modifié et traduit de : RS-Biodiversidade (2010).

L'Amazonie brésilienne est la plus grande étendue continue de forêt tropicale humide sur Terre, abritant le tiers des espèces connues par la science (Alho, 2008b). La forêt amazonienne connaît une déforestation nette très élevée. Selon la FAO (2006 cité dans TEEB, 2008) environ 70 % de terres déboisées de l'Amazonie sont utilisées par des pâturages et par des cultures destinées à l'alimentation animale. Au Brésil, l'Institut national de recherche spatiale (INPE du portugais *Instituto National de Pesquisas Espaciais*) exerce depuis 1988 un suivi satellitaire du taux annuel de déforestation de la forêt amazonienne. Les données de l'INPE (2011b) révèlent qu'entre 1988 et 2009 la superficie annuelle moyenne déboisée aura été d'environ 17 217 kilomètres carrés. Toutefois, il est important de souligner que les superficies

forestières perdues ont diminué substantiellement en 2008-2009 comparativement aux années précédentes, atteignant 7 646 kilomètres carrés. La diminution importante des surfaces déboisée en 2008-2009 peut avoir été influencée par la crise économique ainsi que par les mesures du gouvernement, du secteur privé et des organisations de la société civile pour lutter contre la déforestation (SCDB, 2010).

Le pantanal est considéré comme le plus grand milieu humide au monde. Ce biome couvre plus de 147 000 kilomètres carrés (Alho, 2008a). Cet écosystème exceptionnel est un immense réservoir de biodiversité qui abrite plus de 650 espèces d'oiseaux, 400 espèces de poissons et 80 espèces de reptiles (résumé dans WWF, 2001). La faune du pantanal est fortement influencée par les fluctuations extrêmes du niveau d'eau qui surviennent annuellement (WWF, 2001; Alho, 2008a). La principale menace qui affecte ce vaste milieu humide est la pollution par les pesticides provenant du ruissellement des terres agricoles situées dans les 500 000 kilomètres carrés du bassin versant de la rivière Paraguay (WWF, 2001)

La forêt atlantique brésilienne est la deuxième forêt tropicale humide en importance en Amérique du Sud après la forêt amazonienne. Cette forêt tropicale fait partie des écosystèmes les plus menacés de la planète (Webb *et al.*, 2005) et compte plus de 8000 espèces de plantes endémiques et 567 espèces endémiques de vertébrés (Myers *et al.*, 2000). Ce biome, qui borde la côte est du Brésil, couvrait à l'origine plus d'un million de kilomètres carrés (Webb *et al.*, 2005). Depuis la colonisation du Brésil, les effets combinés de l'expansion des cultures de rentes et de l'exploitation forestière ont réduit ce biome à moins de 7 % de sa superficie d'origine (Rodrigues et Ortiz, 2006).

En ce qui concerne le cerrado, il s'agit du deuxième plus grand biome du Brésil après la forêt amazonienne. Il s'agit d'un écosystème complexe de savanes tropicales qui couvrait à l'origine plus de deux millions de kilomètres carrés (Igari *et al.*, 2009). Le cerrado abrite environ 4 400 espèces de plantes endémiques et 117 espèces endémiques de vertébrés (Myers

et al., 2000). Durant les 35 dernières années, de grandes superficies du cerrado ont été converties en pâturages et en cultures de rentes (Klink et Machado, 2005) et il resterait environ 20 % de la superficie originelle de l'écosystème (Myers *et al.*, 2000). Entre 2002 et 2008, il a été évalué que la superficie du cerrado a diminué en moyenne de plus de 14 000 kilomètres carrés, soit une perte de 0,7 % de sa superficie totale par année, un taux de déforestation bien supérieur au taux actuel de déboisement de la forêt amazonienne (SCDB, 2010).

2.2 De la canne à l'éthanol

Avant d'entreprendre l'étude des différents impacts environnementaux et écologiques de l'éthanol brésilien, une description des procédés agricoles et industriels utilisés pour la production du biocarburant s'impose. Ces explications permettront de clarifier les diverses notions et concepts qui seront subséquemment mentionnés dans le présent chapitre et tout au long de cet essai. Le processus de fabrication de l'éthanol est divisé en deux grandes étapes soit la culture de la canne à sucre et la production de l'éthanol en usine.

2.2.1 La culture de la canne à sucre

Pour la saison 2007-2008, les cultures de canne à sucre occupaient 7,8 millions d'hectares sur le territoire brésilien (Amaral *et al.*, 2008). La plupart des cultures de canne à sucre se retrouvent dans le Centre-Sud du Brésil (85 %) et dans le Nord-Est le long du littoral brésilien (15 %) (Nassar *et al.*, 2008) et plus de la moitié de la production se situe dans l'État de São Paulo (Martinelli et Filoso, 2008). Les plantations de canne à sucre sont d'immenses monocultures maintenues à l'aide de pesticides, d'herbicides, de fertilisants et d'eau. La canne à sucre est plantée en utilisant des boutures et la croissance du plant est de 12 à 18 mois avant que la coupe ne soit effectuée pour la récolte. Le même plant peut être coupé plusieurs fois avant d'être remplacé. Après cinq à six ans, lorsqu'une baisse de productivité des cultures se fait sentir, les plantations sont remplacées par de nouvelles boutures. En général, la majorité

des plantations sont coupées à la main. Avant la récolte, les cultures de canne à sucre sont incendiées. En passant dans les champs, le feu brûle la presque totalité des feuilles et ne laisse que la tige sur pied. Le brûlage permet d'éliminer les feuilles sénescents qui encombrant et blessent les travailleurs. Cette pratique permet entre autres de chasser et de tuer les serpents et les insectes qui représentent un danger potentiel pour les coupeurs de canne à sucre. Les superficies récoltées à l'aide de machinerie agricole ne sont habituellement pas brûlées. Dans un avenir relativement rapproché, la proportion de cultures récoltées mécaniquement sans brûlage est susceptible d'augmenter puisque des mesures légales ont été prises à cet effet (voir section 2.5 du présent chapitre).

2.2.2 Le procédé industriel de production de l'éthanol

Une fois récoltée, la canne est transportée dans les usines où elle subit un procédé industriel pour être transformée en sucre ou en éthanol. En 2006, approximativement 60 % de la récolte annuelle brésilienne de canne à sucre a été utilisée pour produire de l'éthanol alors que les 40 % restant ont servi à la production du sucre (Martinelli et Filoso, 2008). Rendue à l'usine, la canne est d'abord lavée à l'eau afin de retirer la suie et la saleté accumulées sur les plants. Ensuite, la canne à sucre est coupée, broyée et mélangée avec de l'eau. Un jus très riche en saccharose est ainsi obtenu. Par la suite, le jus sucré est fermenté à l'aide de levures afin d'obtenir un mélange alcoolisé. Enfin, l'éthanol est séparé du mélange par distillation. La figure 2.3 expose les différentes étapes du processus industriel de production de l'éthanol.

La production d'éthanol donne des sous-produits à différentes étapes de la production. Les principaux sous-produits sont l'eau de lavage, la bagasse et la vinasse. La bagasse est un résidu fibreux résultant de l'extraction de l'eau sucrée de la canne. En ce qui concerne la vinasse, il s'agit d'une eau usée riche en phosphore obtenue lors du processus de distillation. À partir de 1000 kg de canne, qui servent à produire 12 litres d'éthanol et 94 kg de sucre, en moyenne 250 kg de bagasse et 166 litres de vinasse sont rejetés (Gunkel *et al.*, 2007). Dans la

grande majorité des usines, la bagasse est récupérée et sert de source d'énergie. Elle est utilisée comme biocombustible pour produire de la vapeur et de l'électricité alimentant en énergie le processus de production. Pour ce qui est de la vinasse, elle est mélangée avec de l'eau et le mélange ainsi obtenu est utilisé pour la fertigation des cannaies. La fertigation est un procédé agricole qui combine la fertilisation et l'irrigation qui s'exercent simultanément.

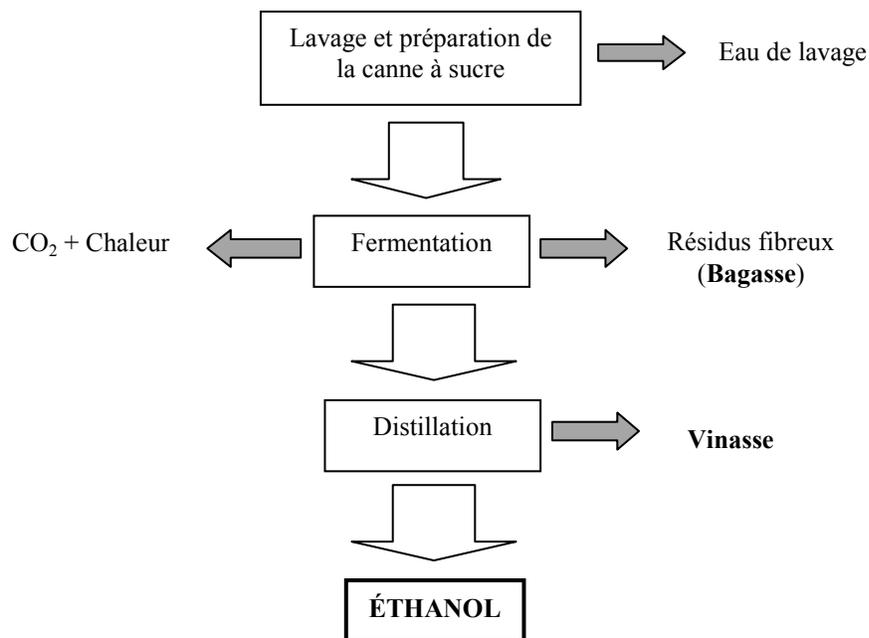


Figure 2.3 Processus industriel de production de l'éthanol

Inspiré de : Zuurbier, P. et Vooren, J. (2008). p. 21

2.3 L'utilisation de l'eau

Pour produire l'éthanol à partir de la canne à sucre, des quantités importantes d'eau sont utilisées. Cette ressource est notamment utilisée pour l'irrigation des cultures et durant les procédés industriels de production du carburant. Le Brésil possède une des plus grandes disponibilités en eau douce au monde. En 1995, il a été estimé que globalement, le pays utilisait seulement 1 % de l'eau douce disponible sur son territoire, un pourcentage qui devrait

atteindre 3 à 5 % d'ici 2075 (Berndes, 2002). Malgré cette situation globale positive, il est important de considérer que régionalement des pénuries d'eau douce surviennent occasionnellement au Brésil (Smeets *et al.*, 2006).

La canne à sucre est reconnue pour avoir des besoins élevés en eau et sa culture peut avoir un impact direct sur la qualité et la quantité d'eau disponible pour les autres secteurs (Varghese, 2007). Dépendant de certains facteurs climatiques, les besoins en eau des cultures de canne à sucre varient de 1 500 et 2 500 mm d'eau par année (FAO, 2002 cité dans Varghese, 2007). La figure 2.4 situe les huit principaux bassins versants du pays, alors que le tableau 2.2 expose les données hydrographiques de ces derniers.



Figure 2.4 Les huit principaux bassins versants du Brésil

Source : Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A. et Dolzan, P. (2006). p. 22

Tableau 2.2 Données hydrographiques des huit principaux bassins versants du Brésil

Nom des bassins	Principale région sucrière	Superficie (1000 km ²)	Précipitation (mm/an)	Évapotranspiration (mm/an)
1 Amazonie	Non	3935	8736	4919
2 Tocantins-Araguaia	Non	757	1257	884
3 Nord et Nord-Est	Oui	1029	1533	1240
4 San Francisco	Oui	634	581	491
5 Atlantique Est	Oui	545	321	246
6 Paraná-Paraguay	Oui	1245	2140	1657
7 Uruguay	Non	178	279	148
8 Atlantique Sud-Est	Non	224	312	177
TOTAL	--	8547	15 158	9761

Source : Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A. et Dolzan, P. (2006). p. 21

La majorité de la production de canne à sucre du Brésil se situe dans le Centre-Sud du pays soit sur le bassin versant de Paraná-Paraguay (Bassin versant no 6 du tableau 2.2). Dans cette région, les précipitations sont abondantes (2140 mm de pluie par an) ce qui procure généralement la quantité d'eau nécessaire à la croissance de la canne à sucre. Par contre, la situation est différente pour le Nord-Est, le Sud-Est et le Centre-Ouest du Brésil (bassins versants no 3, 4 et 5 du tableau 2.2). Dans ces régions, les précipitations sont moins abondantes et l'utilisation de l'irrigation y est alors plus répandue (ESMAP, 2005). En général, l'irrigation des cultures de canne à sucre n'est pas économiquement faisable et n'est pas une option privilégiée, à l'exception des régions arides situées dans l'ouest de l'État de São Paulo (Matoli, 1998 cité dans Smeets *et al.*, 2008). Dans ces régions, une augmentation de l'irrigation est prévue à cause de la croissance importante de la production de canne à sucre (Smeets *et al.*, 2008). Il est estimé que pour les cultures de canne à sucre du Centre-Sud du Brésil, les besoins en eau des cultures (irrigation et précipitations combinées) peuvent atteindre de 900 à 1400 litres d'eau pour produire un seul litre d'éthanol (Varghese, 2007). Ces besoins représentent des volumes d'eau considérables qui sont susceptibles d'influencer la

disponibilité, l'approvisionnement et la qualité de l'eau douce dans les régions sucrières du Brésil. Cependant, aucune donnée n'est disponible quant à la quantité d'eau globale prélevée pour l'irrigation des cannaies au Brésil.

Outre l'irrigation, les procédés industriels permettant la conversion de la canne en éthanol utilisent des quantités importantes d'eau. Cependant, depuis 1995, la quantité d'eau utilisée tend à diminuer considérablement dans les usines de l'État de São Paulo. En 1995, en moyenne 56 litres d'eau étaient utilisés pour produire un litre d'éthanol alors qu'en 2005, environ 26 litres d'eau étaient prélevés pour produire la même quantité d'éthanol (Varghese, 2007). Cette amélioration est due à deux principaux facteurs. D'une part, la mise en place de nouvelles technologies permet un recyclage plus efficace des eaux usées dans les usines d'éthanol. D'autre part, des restrictions légales ont été mises en place dans l'État de São Paulo afin d'optimiser l'utilisation de l'eau sur le territoire. En 1991, le gouvernement de l'État a adopté une loi basée sur les principes d' « utilisateur payeur » et de « pollueur payeur ». Ainsi, dépendant du cas, le pollueur ou l'utilisateur paye en fonction de la quantité d'eau collectée et la qualité de l'eau relâchée. La loi est applicable autant pour la culture de la canne que pour la production de l'éthanol. Toutefois, des informations indiquent que sous des pressions du secteur agricole, le prix de l'eau est souvent fixé à un niveau qui n'affecte pas les coûts de production des industries (Smeets *et al.*, 2008).

Enfin, sans la mise en place de mesures adéquates concernant l'utilisation de l'eau, la production de l'éthanol pourrait éventuellement mener à des problèmes d'approvisionnement en eau douce dans certaines régions du Brésil (Smeets *et al.*, 2008). En outre, les besoins en eau risquent d'être amplifiés par les problèmes de pollution et par la demande en eau des autres secteurs (domestique, agricole, industriel, etc.). De plus, il est à considérer que le secteur projette de doubler les superficies consacrées à la canne à sucre d'ici 2020 (voir tableau 1.2). Cette expansion s'exercera en partie dans des régions où la pluviométrie est moins importante, ce qui risque d'augmenter considérablement la demande en eau pour

l'irrigation (Smeets *et al.*, 2008). De plus, le Brésil projette de produire près de 65 milliards de litres d'éthanol à l'horizon 2020 (Amaral *et al.*, 2008). En tenant compte qu'en moyenne 26 litres d'eau sont utilisés en usine pour produire un litre d'éthanol, le Brésil utilisera près de 1690 milliards de litres d'eau pour produire de l'éthanol en 2020. En ce sens, la mise en place de méthodes permettant de traiter et de recycler les eaux usées s'avère importante pour les producteurs d'éthanol afin d'assurer un approvisionnement suffisant pour les autres secteurs. Selon Pimentel *et al.* (2004 cité dans Smeets *et al.*, 2008), la mise en place de mesures permettant de diminuer de moitié la consommation d'eau dans les distilleries, pourrait augmenter le coût de production de l'éthanol de l'ordre de 8 %.

2.4 Le brûlage des champs de canne à sucre et la pollution de l'air

Au Brésil, le brûlage de la canne à sucre est une pratique couramment utilisée par les producteurs pour faciliter la récolte manuelle. Le brûlage est exercé principalement pour des raisons économiques puisque cette pratique permet de diminuer considérablement les coûts liés aux opérations de récolte (Smeets *et al.*, 2006). Martinelli et Filoso (2008) estiment qu'approximativement 70 % des superficies consacrées à la canne à sucre ont été brûlées au Brésil en 2006, soit environ 4,9 millions d'hectares. Pour chaque hectare, il est estimé que 20 tonnes de biomasse sont brûlées (Cançado *et al.*, 2006). Ainsi, seulement pour l'année 2006, environ 98 millions de tonnes de biomasse ont été incendiées dans les régions sucrières du Brésil.

La combustion de la biomasse représente une source importante de polluants pouvant contaminer les sols et les cours d'eau. En ce qui concerne le brûlage des cannaies, les principaux polluants émis lors de la combustion sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des composés organiques volatils, des particules solides en suspension (PM) et de nombreux gaz (CO, O₃, CH₄, NO_x, N₂O etc.). De plus, il a été observé que cette pratique occasionne régulièrement des dommages aux infrastructures (réseaux électriques,

routes, chemins de fer, etc.) ainsi qu'aux réserves forestières situées à proximité des cultures de canne (Smeets *et al.*, 2006; Goldemberg *et al.*, 2008). Enfin, il est important de noter que la combustion de la bagasse, qui fournit l'énergie aux usines d'éthanol, émet aussi des polluants atmosphériques qui sont principalement des particules solides en suspension et du NO_x (Goldemberg *et al.*, 2008).

Dans diverses régions sucrières du Brésil, des études ont mesuré des concentrations atmosphériques élevées d'HAP associées au brûlage de la canne à sucre (Azevedo *et al.*, 2002; Santos *et al.*, 2002). Dans la plus importante région sucrière de l'État de Rio de Janeiro, Gomes et Azevedo (2003) ont détecté des HAP dans les sédiments de lacs. Dans cette région, le brûlage des plantations de canne est reconnu pour être une source significative d'HAP dans les sols et les sédiments (Santos *et al.*, 2002). À Araraquara, une importante région sucrière de l'État de São Paulo, des concentrations élevées d'HAP atmosphériques ont aussi été mesurées, et un des composés identifiés, le benzo[a]pyrene, est reconnu pour avoir des propriétés hautement carcinogènes (Godoi *et al.*, 2004).

En milieu tropical, la combustion de la biomasse est reconnue pour être une source très importante de particules solides en suspension (Crutzen et Andreae, 1990). Les particules solides en suspension peuvent être responsables de problèmes respiratoires (voir chapitre 3, section 3.2). Une étude de Lara *et al.* (2005), menée dans la région de Paracicaba dans l'État de São Paulo, a démontré que durant la saison des récoltes, la concentration de particules en suspension était significativement plus élevée (91 µg/m³) que durant le reste de l'année (34 µg/m³). Des concentrations similaires ont été enregistrées par Allen *et al.* (2004) à Araraquara, une autre région sucrière de l'État de São Paulo. Dans les deux régions, les chercheurs ont mesuré des pics pouvant atteindre 240 µg/m³ durant la saison des récoltes. Les concentrations mesurées dans les régions sucrières peuvent être considérées comme potentiellement dangereuses pour la santé humaine, d'autant plus que la concentration maximale prévue par la loi brésilienne est de 70 µg/m³.

L'émission de gaz dans l'atmosphère est un autre aspect de la pollution atmosphérique associée au brûlage des cultures de canne à sucre. Dans les régions sucrières, les feux provoquent des concentrations atmosphériques élevées de monoxyde de carbone (CO), d'ozone (O₃) (Kirshoff *et al.*, 1991 dans Martinelli et Filoso, 2008) et de méthane (CH₄), des gaz potentiellement dangereux pour la santé humaine (Smeets *et al.*, 2006). De plus, les émissions d'oxyde d'azote (NO_x) peuvent atteindre 25 kg N/ha (Oppenheimer *et al.*, 2004). L'azote émis dans l'atmosphère sous forme de NO_x durant le brûlage de la canne à sucre retombe sur le sol principalement sous forme de précipitations acides. Dans l'atmosphère, l'oxyde d'azote réagit avec l'eau pour former de l'acide nitrique (HNO₃). En ce sens, une étude de Lara *et al.* (2001) a démontré que la formation d'acide nitrique est la cause principale des pluies acides de la région sucrière de Paracicaba. Les pluies acides peuvent causer divers effets néfastes pour l'environnement comme la baisse de productivité des forêts et des cultures, l'acidification des sols et des cours d'eau et la perte de biodiversité (résumé dans Lara *et al.*, 2001).

2.5 La mécanisation de la récolte

Conscient des problèmes de pollution de l'air, le gouvernement fédéral ainsi que certains états brésiliens ont établi des échéanciers afin de diminuer, voir dans certains cas éliminer le brûlage de la canne à sucre. L'arrêt de cette pratique s'effectuera principalement par le transfert graduel de la récolte manuelle vers une récolte mécanisée, puisque la machinerie agricole est en mesure de récolter efficacement sans le brûlage des champs. De ce fait, en 1998, le gouvernement fédéral a adopté une loi qui planifie l'arrêt graduel d'ici 2018 du brûlage de la canne à sucre dans les zones où la mécanisation de la récolte est possible (pentes de moins de 12 % d'inclinaison). Par contre, la loi n'interdit pas le brûlage sur les terrains où la mécanisation n'est pas possible, ce qui est le cas pour approximativement 50 % des cultures du Nord-Est et pour 20 % des cultures du pays (Rodrigues et Ortiz, 2006). En 2002, l'État de São Paulo a adopté une loi interdisant le brûlage sur toutes les cultures de canne à sucre de son

territoire d'ici 2031. En août 2008, une initiative similaire a été prise par l'État du Minas Gerais qui a mis en place Le Protocole sur l'élimination du brûlage de la canne pour le secteur de l'alcool et du sucre (du portugais *Protocolo de Intenções de Eliminação da Queima da Cana no Setor Sucroalcooleiro de Minas Gerais*). Le tableau 2.3 expose les échéanciers de la législation brésilienne concernant l'arrêt du brûlage de la canne à sucre.

Tableau 2.3 Échéanciers de la législation requérant le retrait du brûlage de la canne à sucre au Brésil et proportion non brûlée dans les différentes zones

Décret de l'État de São Paulo ¹ de 2002			Loi fédérale de 1998 ²		
Années	Zone où la ³ mécanisation est possible (%)	Zone où la ⁴ mécanisation est impossible (%)	Années	Zone où la ³ mécanisation est possible (%)	Zone où la ⁴ mécanisation est impossible (%)
2002	20		1998	--	--
2006	30		2003	25	--
2011	50	10	2008	50	--
2016	80	20	2013	75	--
2021	100	30	2018	100	--
2026		50			
2031		100			

Légende :
-- : non applicable
1 : Décret numéro 11,241 du 19 septembre 2002
2 : Loi numéro 2,661 passée par le gouvernement fédéral, le 8 juillet 1998
3 : Zone où la mécanisation est possible : inclinaison du terrain inférieure à 12 %
4 : Zone où la mécanisation est impossible : inclinaison du terrain supérieure à 12 %

Traduction libre

Source : ESMAP (2005). p. 126

La mécanisation de la récolte représente certains avantages comparativement à la récolte manuelle. Ces avantages relèvent principalement de l'arrêt du brûlage : diminution des émissions polluantes, réduction de l'érosion du sol, diminution des dommages aux infrastructures et aux forêts et augmentation de la disponibilité en biomasse (feuilles) pour la

production d'énergie dans les usines. Malgré ces avantages, la mécanisation fait face à de vives oppositions puisqu'elle occasionnera de nombreuses pertes d'emplois. Une seule machine de récolte remplace de 80 à 100 coupeurs de canne à sucre (de Resende *et al.*, 2006). Smeets *et al.* (2008) estiment qu'entre 52 % et 64 % des emplois directement impliqués dans la production de la canne seront perdus à cause de la mécanisation. En fait, la meilleure façon d'éliminer la pollution de l'air et d'éviter la perte d'emplois serait de pratiquer une récolte manuelle sans brûlage pour l'ensemble des cannaies du Brésil. Cependant, cette option n'est pas envisageable par les industriels puisqu'elle engendrerait des coûts élevés de main-d'œuvre. Encombrés par les feuilles, la productivité des travailleurs risquerait de diminuer et les employeurs se verraient obligés d'augmenter les salaires afin de compenser les travailleurs pour la baisse de productivité. En fait, une augmentation de 40 % du coût de production de l'éthanol serait à prévoir si cette méthode était appliquée (voir Smeets *et al.*, 2006). Une option plus réaliste a toutefois été proposée par Smeets *et al.* (2008). Cette dernière consiste à compenser les pertes d'emplois encourues en octroyant des prestations de chômage aux travailleurs ayant perdu leur emploi. Si une telle mesure était mise en place, une augmentation du coût de production de l'éthanol de 8 % serait à prévoir (voir Smeets *et al.*, 2008).

2.6 La dégradation des sols

La dégradation des sols causée par l'érosion et la compaction est une importante conséquence environnementale de la monoculture intensive de la canne à sucre. En comparaison avec les sols des pâturages et des forêts, les sols des monocultures de canne à sucre font face à de graves problèmes d'érosion (Sparovek et Schnug, 2001b). L'érosion et la compaction occasionnent la dégradation et la détérioration de la structure du sol et une importante perte de nutriments et de composés nécessaires au bon développement des végétaux. De plus, l'érosion des sols peut occasionner une diminution du stock de carbone organique du sol (voir section 2.10.2). La dégradation des sols est souvent associée aux pratiques culturales.

Dans le cas de la canne à sucre, des pratiques comme l'exposition des sols aux intempéries, le brûlage des plantations et l'utilisation accrue de machinerie agricole peuvent occasionner une dégradation notable des sols. Premièrement, durant la préparation des champs et entre les récoltes, les sols sont laissés à nu durant des périodes de temps relativement longues. Lorsque la canne est remplacée tous les cinq à six ans, le sol reste découvert durant plusieurs mois (Martinelli et Filoso, 2008). Les sols nus (sans couvert végétal) sont exposés aux pluies ainsi qu'aux vents, ils sont alors plus vulnérables à l'érosion hydrique et éolienne. Deuxièmement, la machinerie agricole est de plus en plus utilisée au Brésil pour la préparation du sol, la récolte et l'épandage de fertilisants et de pesticides. En circulant dans les champs, la machinerie compacte les particules du sol ce qui affecte les propriétés physiques de ce dernier (Hartermink, 2008). Une diminution de la porosité et de la densité du sol causées par la compaction du sol empêche l'infiltration de l'eau et le cas échéant augmente l'érosion hydrique au champ (révisé dans Martinelli et Filoso, 2008). Finalement, le brûlage des champs provoque aussi une dégradation des sols. La chaleur dégagée par les feux augmente la température du sol et assèche ce dernier. Par conséquent, le feu occasionne une diminution de la masse volumique du sol ce qui provoque une compaction qui favorise l'écoulement de surface et favorise l'érosion hydrique (révisé dans Martinelli et Filoso, 2008).

Sparovek et Schnug (2001b) ont estimé à environ 30 tonnes de sol/ ha·an⁻¹ le taux d'érosion des sols des monocultures de canne à sucre dans la région sucrière de São Paulo, alors que le taux d'érosion des sols des forêts et des pâturages n'excède pas 2 tonnes de sol/ha·an⁻¹. En général, le taux d'érosion des sols dans les agrosystèmes tropicaux est plus élevé que le taux de formation des sols qui est en moyenne de 2 tonnes de sol/ha·an⁻¹ (Sparovek et Schnug, 2001b). Afin de réduire l'érosion des sols, diverses mesures peuvent être mise en place par les producteurs de canne à sucre. Au Brésil, le drainage, l'aménagement de talus, le maintien d'un couvert végétal au sol et le travail réduit du sol sont les principales mesures utilisées pour réduire l'érosion et le ruissellement au champ (Hartermink, 2008; Sparovek et Schnug, 2001a). Smeets *et al.* (2008b) estiment que la mise en place de mesures permettant de réduire

l'érosion de 20 tonnes de sol/ ha·an⁻¹ jusqu'à un niveau semblable au taux de formation du sol (2 tonnes de sol /ha·an⁻¹) augmenterait le coût de production de l'éthanol de 3 %.

2.7 La pollution de l'eau

La monoculture intensive de la canne à sucre peut être une cause importante de la pollution de l'eau et de la dégradation des systèmes aquatiques. Cette dégradation est causée principalement par les nutriments, la matière organique et les produits agrochimiques qui sont entraînés par la pluie et le ruissellement jusque dans les cours d'eau. L'accumulation de ces composés dans les cours d'eau occasionne une dégradation de la qualité de l'eau qui peut causer une perte de biodiversité et nuire aux fonctions des écosystèmes aquatiques (résumé dans Martinelli et Filoso, 2008).

2.7.1 La sédimentation

L'écoulement de surface qui se produit dans les champs de canne à sucre emporte des quantités importantes de particules qui s'accumulent dans les ruisseaux, les rivières, les lacs, et les réservoirs naturels et artificiels. Un exemple concret du problème de sédimentation lié à la culture de canne à sucre a été mis en évidence par Fiorio *et al.* (2000). Ces chercheurs ont observé l'évolution d'une petite étendue d'eau située dans la région de Piracicaba dans l'État de São Paulo. Ce réservoir fournissait à l'époque en eau une petite ville. En 1978, le bassin versant de ce réservoir était occupé à 25 % par des plantations de canne à sucre. Après deux décennies, les plantations couvraient 70 % du bassin versant du réservoir et ce dernier ne pouvait plus être utilisé par la ville pour la fourniture en eau. En fait, durant 20 années l'accumulation de sédiments dans le réservoir a été telle que ce dernier a perdu plus de 50 % de sa capacité de chargement le rendant inefficace pour l'approvisionnement en eau.

Au Brésil, la plupart des villes et des zones rurales s'approvisionnent en eau à partir de réservoirs naturels et artificiels (Martinelli et Filoso, 2008). De plus, le pays produit une grande partie de son énergie grâce à l'hydroélectricité qui dépend du bon fonctionnement des systèmes hydrologiques. Ainsi, une aggravation des problèmes de sédimentation pourrait occasionner des répercussions sociales et économiques importantes (résumé dans Martinelli et Filoso, 2008) en plus des conséquences environnementales. En effet, le problème de la sédimentation est aggravé par le transport de nombreux contaminants des plantations de canne jusqu'aux milieux aquatiques. Les deux principaux types de contaminants retrouvés dans les cours d'eau sont les polluants organiques et les produits agrochimiques (Smeets *et al.*, 2006; Martinelli et Filoso, 2008).

2.7.2 Les polluants organiques

Les polluants organiques retrouvés dans les cours d'eau proviennent principalement de la vinasse, un déchet industriel à haute teneur en phosphore, en nutriments et en matière organique. Les nutriments et la matière organique contenus dans la vinasse peuvent tous deux altérer la qualité de l'eau. Des concentrations élevées en nutriments peuvent causer des blooms d'algues et entraîner l'eutrophisation (Tundisi *et al.*, 2008), tandis que la matière organique lorsqu'elle se retrouve dans l'eau augmente la turbidité et la demande biochimique en oxygène (DBO). La DBO est la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les composés organiques biodégradables. Naturellement, cette demande accrue en oxygène contribue à l'épuisement de l'oxygène dissout dans l'eau, ce qui peut causer une anoxie (milieu sans oxygène) (Ballester *et al.*, 1999). Dans les écosystèmes aquatiques, l'anoxie peut provoquer la mort des poissons et des autres formes de vie aquatique dépendantes de l'oxygène (de Resende *et al.*, 2006).

Des volumes importants de vinasse sont produits par les usines, soit entre 10 et 15 litres pour chaque litre d'éthanol produit (ESMAP, 2005). Au commencement du *Proalcool*, d'énormes quantités de vinasse étaient directement rejetées dans les cours d'eau, ce qui causait de graves

problèmes environnementaux (de Resende *et al.*, 2006). En 1978, le gouvernement brésilien a adopté une loi afin d'interdire les déversements de vinasse dans les eaux de surface. Depuis, la vinasse est diluée dans l'eau et est utilisée pour la fertigation des champs de canne à sucre (Gunkel *et al.*, 2007). Cependant, la fertigation représente elle aussi une source potentielle de pollution pour les eaux de surface. En fait, les nutriments et la matière organique peuvent atteindre les cours d'eau par voie diffuse (ruissellement, lixiviation, écoulement des eaux de surfaces, etc.) et par voie directe, soit accidentellement lors de l'entreposage et le transport de la vinasse. De plus, selon Martinelli et Filoso (2008), encore aujourd'hui, il n'est pas rare que les petites distilleries déversent directement la vinasse dans les cours d'eau à cause d'un manque d'infrastructures pour le transport et l'entreposage.

Une étude de Gunkel *et al.* (2007), menée dans le Nord-Est brésilien, met en évidence les problèmes de contamination des eaux de surface causés par les polluants organiques. L'équipe de Gunkel *et al.* (2007) a étudié le cas de la rivière Ipojuca, dont une grande partie du bassin versant est occupée par des cultures de canne à sucre. Les chercheurs ont détecté une baisse importante de l'oxygène dissout dans la rivière lors des périodes de fertigation. En fait, la pollution organique atteindrait la rivière par voie diffuse puisque les chercheurs ont détecté une corrélation significative positive entre la qualité de l'eau et la quantité de précipitations journalières. Cette étude a démontré que les principaux problèmes écologiques de la rivière, causés en grande partie par la fertigation, sont le réchauffement de l'eau, une augmentation de la turbidité, une acidification et une diminution de l'oxygène dissout.

Des technologies ont été développées afin de traiter et recycler efficacement les eaux usées provenant des distilleries. Ces procédés permettent notamment de réduire considérablement les émissions de polluants organiques dans l'environnement. Selon Pimentel *et al.* (2004, cité dans Smeets *et al.*, 2008), la mise en place de ces technologies engendrerait une augmentation du prix de l'éthanol de 8 % (il s'agit des mêmes coûts permettant la réduction de la consommation de l'eau mentionnés à la section 2.3). Ce calcul est basé sur les coûts de

production de l'usine São Francisco de l'État de São Paulo, une des plus importantes industries à produire de la canne à sucre biologique au Brésil (voir Smeets *et al.*, 2008).

2.7.3 Les produits agrochimiques

Les produits agrochimiques utilisés pour la culture de la canne sont les herbicides, les insecticides et les pesticides (Goldemberg *et al.*, 2008). Ces produits sont principalement utilisés pour augmenter et maintenir la productivité des plantations. Il est estimé que sans l'application de ces produits les cultures peuvent perdre jusqu'à 80 % de leur productivité (Macedo, 2005 cité dans Smeets *et al.*, 2008). En général, la quantité de produits agrochimiques appliqués par hectare sur les plantations de canne est moindre comparé à la quantité appliquée sur d'autres cultures (café et maïs) (Macedo, 2005 cité dans Smeets *et al.*, 2008). Cependant, des études ont démontré que ces produits contribuent de manière importante à la pollution des milieux aquatiques dans les régions sucrières (Lara *et al.*, 2001; de Armas *et al.*, 2005). En fait, tout comme les polluants organiques ces contaminants peuvent atteindre les eaux de surface par voie diffuse (Corbi *et al.*, 2006).

Contrairement à la matière organique et les nutriments, certains produits agrochimiques peuvent persister dans l'environnement et ainsi sont susceptibles de s'accumuler dans les organismes vivants. Ce phénomène est appelé la bioaccumulation. Une fois rendus dans la colonne d'eau, les pesticides peuvent être absorbés par des organismes et s'accumuler dans les différents niveaux trophiques des écosystèmes aquatiques. En atteignant des niveaux trophiques supérieurs de la chaîne alimentaire, les contaminants s'accumulent dans les tissus des organismes vivants. Ainsi, les produits agrochimiques se retrouvent en plus grandes concentrations dans les organismes situés dans le haut de la chaîne alimentaire, comme les grands mammifères dont fait partie l'homme (Odum, 1988 cité dans Corbi *et al.*, 2006).

En 1985, le gouvernement brésilien interdisait l'utilisation des composés organochlorés, des pesticides et des herbicides responsables de bioaccumulation. Malgré le fait que ces composés soient interdits depuis plus de deux décennies, des études récentes ont retrouvé ces produits dans des sédiments, des poissons et des bivalves de rivières situés dans des régions sucrières de l'État de São Paulo (Corbi *et al.*, 2006; Silva *et al.*, 2008). Les organochlorés retrouvés possèdent des demi-vies relativement courtes (Silva *et al.*, 2008). Le fait que ces produits soient encore présents dans l'environnement prouve qu'ils sont actuellement utilisés clandestinement par des producteurs de canne à sucre (Silva *et al.*, 2008).

La pollution provoquée par l'application des produits agrochimiques peut être réduite par différents moyens, entre autres par la mise en place de bonnes pratiques agroenvironnementales. Parmi les diverses techniques agricoles qui pourraient être utilisées, il y a la lutte intégrée contre les ravageurs, le remplacement de certains produits agrochimiques par des produits moins toxiques, l'utilisation d'agents biologiques dans la lutte contre les ravageurs et le désherbage mécanique ou manuel. Naturellement, l'utilisation de produits agrochimiques peut être évitée par la mise en place de cultures de canne biologiques sous la tutelle d'un label certifié. Néanmoins, ces pratiques agroenvironnementales sont très peu utilisées au sein de l'industrie brésilienne puisqu'elles impliquent sans contredit des coûts de production supplémentaires. Généralement, les industriels optent davantage pour des techniques moins onéreuses permettant de produire l'éthanol à faible coût. On compte encore aujourd'hui très peu de production de canne à sucre possédant la certification biologique.

2.7.4 La dégradation des écosystèmes riverains

En milieu agricole, les forêts riveraines qui occupent les pourtours des ruisseaux, des rivières et des lacs jouent un rôle écologique primordial en aidant à maintenir la qualité de l'eau. En fait, ces écosystèmes captent et retiennent une partie des sédiments et des contaminants qui descendent des champs par l'écoulement des eaux de surface (Sparovek *et al.*, 2002). Lorsque

les forêts riveraines sont supprimées, les impacts néfastes de la culture de la canne à sucre et de la production de l'éthanol sont exacerbés par une dégradation de la qualité de l'eau, une diminution de la biodiversité et une augmentation de la sédimentation (Corbi *et al.*, 2006). Selon la loi brésilienne, la végétation doit être conservée sur les rives de tous les cours d'eau. Ces zones forestières deviennent alors des Aires de préservation permanente. Le tableau 2.4 expose la largeur de la bande boisée à conserver en fonction de la largeur du cours d'eau.

Tableau 2.4 Législation brésilienne en matière de bandes riveraines

Largeur du cours d'eau (m)	Largeur de la bande riveraine à conserver (m)
10 et moins	30
10 à 50	50
50 à 200	100
200 à 500	200
500 et plus	500

Inspiré de : Silva, A.M. *et al.* (2007). p. 328

Malgré le fait qu'ils soient protégés par la loi, ces écosystèmes sont constamment menacés par l'expansion des terres agricoles et très souvent, ils sont détruits. Une étude de Silva *et al.* (2007) a évalué la condition des écosystèmes riverains des sept plus importants bassins versants de l'État de São Paulo. Afin de ne pas surévaluer la dégradation, les chercheurs ont évalué la condition des écosystèmes pour une largeur de 30 m (norme minimale) de végétation sur tous les plans d'eau de l'État. L'étude démontre que 75 % des écosystèmes riverains auraient été convertis en plantations de canne à sucre et en pâturages. En fait, il s'agit de plus de 4 646 km² de forêt qui devraient être restaurés seulement pour l'État de São Paulo. Silva *et al.* (2007) ont mis en évidence l'ampleur des coûts que peut entraîner la restauration de ces écosystèmes. En 2007, on estimait à 3 350 USD par hectare le coût de la restauration des forêts riveraines dans la région de Piracicaba. En assumant que ce coût est le même pour les

autres régions de l'État, le coût final de la restauration d'approximativement 4 700 km² coûterait au bas mot 1,57 milliard de dollars américains.

De toute évidence, conformément aux données recueillies par Silva *et al.* (2007), le non-respect de la législation en matière de conservation des écosystèmes riverains semble être un problème important au Brésil. Afin de se conformer à la loi, les producteurs de canne à sucre devraient assurer la préservation et la restauration des forêts riveraines de leurs propriétés. Naturellement, ces mesures exigeraient des investissements massifs de leur part, ce qui entraînerait une augmentation du coût de production de l'éthanol.

2.7.5 La pollution des réserves d'eaux souterraines : l'exemple de l'aquifère Guarani

Tel que vu précédemment, les produits agrochimiques et les fertilisants appliqués dans les champs de canne à sucre peuvent constituer une source importante de pollution des eaux de surface. Toutefois, les intrants chimiques peuvent aussi représenter une source potentielle de contamination pour les réserves d'eaux souterraines (résumé dans de Armas *et al.*, 2007). En fait, les composés agrochimiques ont la capacité de persister dans l'environnement et possèdent une forte mobilité, ce qui peut leur permettre de s'infiltrer profondément dans le sol. Au Brésil, la contamination des réserves souterraines d'eau douce pourrait entraîner des impacts négatifs sur l'approvisionnement en eau potable. À titre d'exemple, dans l'État de São Paulo, l'État le plus peuplé du Brésil, 70 % des 656 municipalités qui occupent le territoire sont approvisionnées en partie ou en totalité par les réserves d'eaux souterraines (Hirata *et al.*, 2007). La contamination des eaux souterraines causée par les activités agricoles liées à la production de canne à sucre est un phénomène encore relativement peu étudié au Brésil. Toutefois, l'intérêt scientifique envers ce phénomène est grandissant, puisque certaines régions productrices de canne à sucre se situent dans des zones de recharge d'une gigantesque réserve d'eau souterraine, l'aquifère Guarani. La figure 2.5 représente l'emplacement de l'aquifère Guarani sur le continent sud-américain.

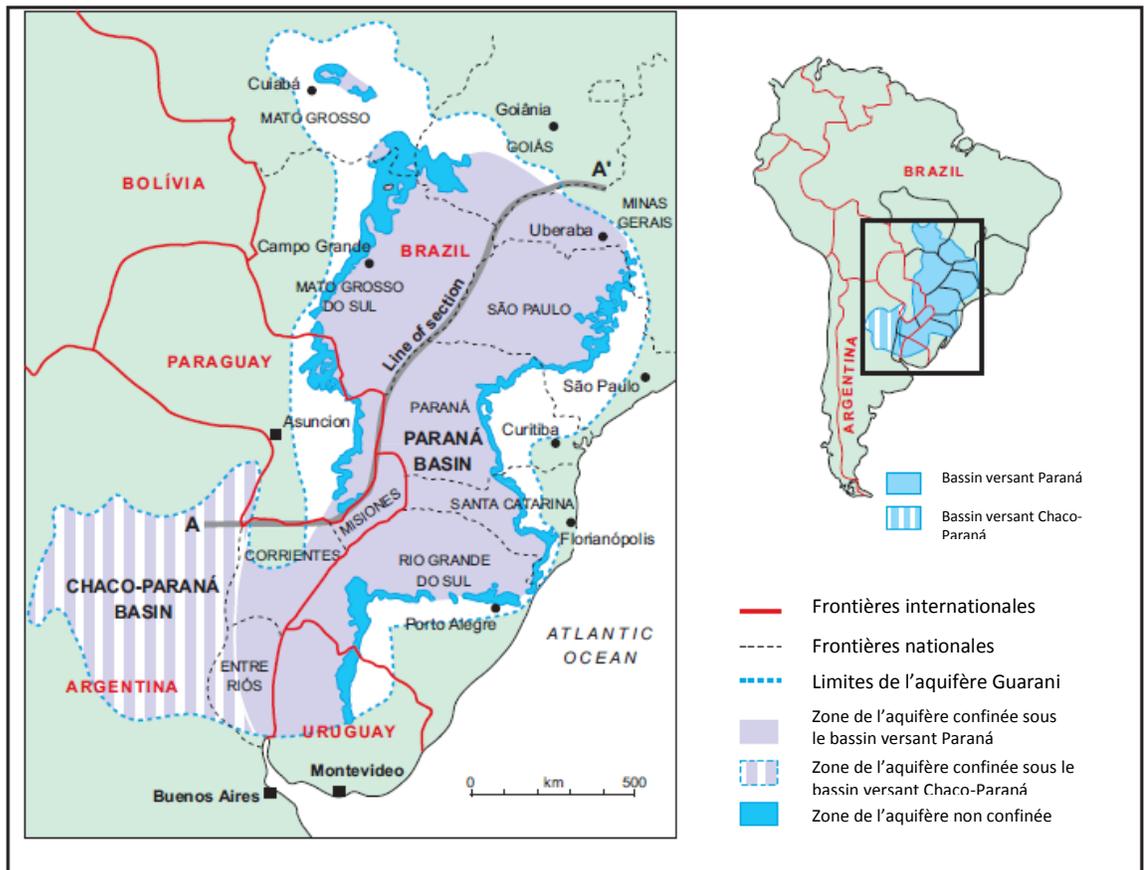


Figure 2.5 Situation géographique de l'aquifère Guarani

Traduction libre

Source : UNESCO (2001). p. 46

L'aquifère Guarani occupe un territoire de 1,2 million de kilomètres carrés partagé entre le Brésil, l'Uruguay, le Paraguay et l'Argentine. Il est considéré comme étant la plus grande ressource transfrontalière d'eau douce souterraine au monde (Rabelo et Wendland, 2009). Plus des deux tiers de l'aquifère se retrouve au Brésil sous le sol des États de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina et Rio Grande do Sul (voir figure 2.5). Des études hydrologiques estiment que l'aquifère contient 40 000 kilomètres cubes d'eau douce et 90 % de ce volume est potable (Kemper *et al.*, 2003). L'aquifère Guarani

possède une eau d'excellente qualité qui est puisée à l'aide de puits semi-artésiens pour l'approvisionnement de centaines de villes de moyenne et grande importance (SEAMA, 2008 cité dans Queiroz *et al.*, 2009). Les zones de recharge de l'aquifère Guarani qui se retrouvent au Brésil, couvrent plus de 100 000 kilomètres carrés et sont des zones où l'eau de pluie s'infiltré profondément dans le sol et atteint des zones de saturation (Queiroz *et al.*, 2009). À l'heure actuelle, un certain nombre d'études portant sur la contamination des eaux de l'aquifère Guarani par les produits agrochimiques ont été menées au sein de la région de Ribeirão Preto dans l'État de São Paulo. La plupart de ces travaux ont été réalisés en collaboration avec l'Entreprise brésilienne de recherche agricole (EMBRAPA, du portugais Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), un organisme qui relève du ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de l'Approvisionnement du Brésil.

La région de Ribeirão Preto est une importante région sucrière qui produit près de 30 % de l'éthanol et du sucre au pays (Picoli *et al.*, 2005 cité dans Queiroz *et al.*, 2009). Dans cette région, des études géologiques ont identifié le bassin versant d'une région nommée Espiraído comme un modèle pour l'étude de la contamination des eaux souterraines par les herbicides (résumé dans Cerdeira *et al.*, 2005). En fait, le bassin versant Espiraído est une zone de recharge de l'aquifère Guarani où l'application de produits agrochimiques est intensive (Queiroz *et al.*, 2009). Une étude de Gomes *et al.* (2001) menée dans cette région a identifié la présence d'un pesticide, le tebuthiurone, dans les échantillons d'eau souterraine à partir d'un puits semi-artésien de 53 m de profondeur. Le contrôle, effectué entre 1995 et 1999, a montré que le tebuthiurone était présent dans tous les échantillons, mais à des concentrations en dessous du niveau critique pour les normes de consommation fixées par la Communauté économique européenne ($0,1 \text{ mg L}^{-1}$). Les auteurs de l'étude mettent en garde contre le danger de contamination des eaux souterraines par l'herbicide étudié, puisque les concentrations du produit pourraient augmenter en raison de conditions environnementales favorables. En outre, une étude de Queiroz *et al.* (2009) a démontré que l'hexazinone, un herbicide largement utilisé pour la culture de la canne à sucre, possède un potentiel de contamination pour les eaux

souterraines. Toutefois, d'autres études ont effectué le suivi de certains herbicides (tebuthiurone, diurone, atrazine, simazine et amétryne) et n'ont détecté aucune trace de ces composés dans les eaux souterraines (Cerdeira *et al.*, 2005; Cerdeira *et al.*, 2007).

Selon la littérature, il semble exister un risque tangible de contamination de l'aquifère Guarani par les activités agricoles ayant cours dans les zones de recharge. Néanmoins, la capacité des herbicides à atteindre les eaux souterraines peut dépendre d'une multitude de paramètres (*e.g.* les propriétés de l'herbicide, le type de sol, les conditions météorologiques, les microorganismes du sol, le type de cultures, la topographie; résumé dans Queiroz *et al.*, 2009). Le comportement de certains herbicides comme l'hexazinone dans les conditions brésiliennes est encore très peu connu (Queiroz *et al.*, 2009). Il ne reste pas moins que les zones de recharge de l'aquifère Guarani demeurent particulièrement vulnérables et devraient faire l'objet de programmes de planification et de gestion environnementale pour éviter la contamination des eaux souterraines (Dantas *et al.*, 2009). De plus, davantage de recherches sont nécessaires afin d'évaluer le potentiel de contamination que représentent les cultures de canne à sucre situées dans ces zones sensibles.

2.8 L'expansion des cultures de canne à sucre et le zonage agroécologique national de la canne à sucre

Le Brésil possède actuellement les plus grandes superficies consacrées aux plantations de canne à sucre dans le monde. Depuis l'implantation de la canne à sucre sur le territoire brésilien au 16^e siècle, les superficies consacrées aux monocultures de canne ont crû considérablement et plus particulièrement depuis la mise en place du *Proalcool*. Depuis les années soixante, les superficies de cannes à sucre sont passées de 1,4 million d'hectares (Martinelli et Filoso, 2008) à plus de huit millions d'hectares aujourd'hui (Amaral *et al.*, 2008). De plus, avec la demande croissante de l'éthanol sur les marchés mondiaux, le secteur du sucre et de l'alcool projette de doubler les superficies agricoles dédiées à la production de

la canne à sucre d'ici 2020 (Amaral *et al.*, 2008; voir tableau 1.2). L'expansion des cultures aura des impacts importants sur les écosystèmes naturels, qui sans la mise en place d'une planification adéquate, pourraient disparaître ou être complètement dégradés.

Jusqu'à tout récemment, le gouvernement brésilien n'avait établi aucun plan global pour contrôler l'expansion des cultures de canne à sucre au pays (Smeets *et al.*, 2008). Toutefois, l'expansion des cultures de canne à sucre était assujettie au Code forestier de 1965 (CF du portugais *Código Florestal*) une loi qui limite l'accessibilité des zones forestières aux diverses occupations du territoire. En vertu du CF, les propriétaires terriens du Brésil sont tenus de maintenir une proportion de leur propriété couverte par de la végétation native et ce territoire obtient le titre de Réserve forestière légale. La proportion du couvert végétal à protéger par les propriétaires terriens varie en fonction des régions du Brésil : 80 % dans la région de l'Amazonie, 35 % dans le cerrado et 20 % pour toutes les autres régions du pays. De plus, comme il a été mentionné précédemment, les propriétaires terriens sont dans l'obligation de conserver la végétation bordant les cours d'eau de leur propriété (voir section 2.7.4) ainsi que la végétation naturelle située sur les collines et sur les pentes de plus de 45 degrés (Igari *et al.*, 2009). Ces zones forestières deviennent alors des Aires de préservation permanente, des zones qui doivent être maintenues ou restaurées à leur état naturel (Smeets *et al.*, 2008). Il est important de souligner que la superficie des Réserves forestières légales d'une propriété ne peut pas inclure les Aires de préservation permanente (Igari *et al.*, 2009).

En septembre 2009, l'ancien président du Brésil, Luiz Inácio Lula da Silva instaurait le zonage agroécologique national de la canne à sucre (*ZAE Cana* du portugais *Zoneamento Agroecológico Nacional da Cana-de-açúcar*) par le biais du Décret présidentiel no 6.961. Le *ZAE Cana* est une initiative sans précédent qui a pour objectif d'orienter l'expansion de la canne à sucre (EMBRAPA, 2009). Ce zonage fait l'objet d'un projet de loi qui a été acheminé au Congrès national du Brésil en septembre 2009. Bien qu'il ne s'agisse encore que d'un

projet de loi, les principaux éléments restrictifs du *ZAE Cana* se retrouvent dans le décret fédéral en question et ont pris effet à la date de publication du décret.

Avec l'arrivée du décret et l'arrivée éventuelle de la loi, des éléments bien précis viennent dorénavant encadrer l'expansion de la canne à sucre au Brésil. Dans le cadre du *ZAE Cana*, il sera interdit d'établir de nouvelles cannaies dans : 1. les terres avec une inclinaison supérieure à 12 %, respectant la prémisses de la récolte mécanique et sans brûlage pour les superficies d'expansion; 2. les zones couvertes par de la végétation native; 3. les biomes de l'Amazonie, du pantanal et du bassin versant du Haut Paraguay; 4. les aires protégées; 5. les territoires indigènes; 6. les fragments forestiers; 7. les dunes; 8. les mangroves; 9. les escarpements et les affleurements rocheux; 10. les zones reboisées; 11. les zones urbaines et les mines.

Les restrictions enchâssées dans le *ZAE Cana* viennent maintenant limiter l'accessibilité du territoire à l'expansion future des cannaies au Brésil. Malgré ces nouvelles limitations, il est important de souligner que des superficies considérables demeurent disponibles à l'expansion des cultures de canne à sucre. Les résultats obtenus par l'exercice du *ZAE Cana* démontrent que le pays possède environ 63,5 millions d'hectares de terres agricoles propices et éventuellement disponibles à l'expansion de cette culture (EMBRAPA, 2009). De ce nombre, 18 millions d'hectares représentent un potentiel de production élevé, 41,2 millions d'hectares représentent un potentiel moyen et 4,3 millions d'hectares ont un faible potentiel pour la culture de la canne (EMBRAPA, 2009). En théorie, la canne à sucre pourrait ainsi couvrir près de 7,5 % du territoire national, et ce, tout en respectant les nouvelles restrictions du *ZAE Cana*.

À court et moyen terme, l'expansion prévue par l'industrie de l'éthanol et du sucre aura lieu principalement au Centre-Sud du Brésil dans les États de Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul ainsi que dans le nord-ouest de l'État de São Paulo (Goldemberg *et al.*, 2008). La figure 2.6 expose la localisation des plantations de canne à sucre par rapport aux principaux

biomes du Brésil ainsi que les principaux projets d'usines de sucre et d'éthanol. Le cerrado est situé relativement près de la plupart des plantations de canne à sucre du Centre-Sud. L'expansion prévue par l'industrie surviendra en partie à l'intérieur des frontières du cerrado (voir figure 2.6). Ces régions ont été ciblées puisqu'elles possèdent des conditions climatiques et topographiques idéales pour la production de la canne à sucre (Martinelli et Filoso, 2008). Pour l'implantation de nouveaux projets d'usines, l'expansion des cultures s'effectuera principalement au détriment des pâturages et de terres dégradées (Goldemberg *et al.*, 2008).

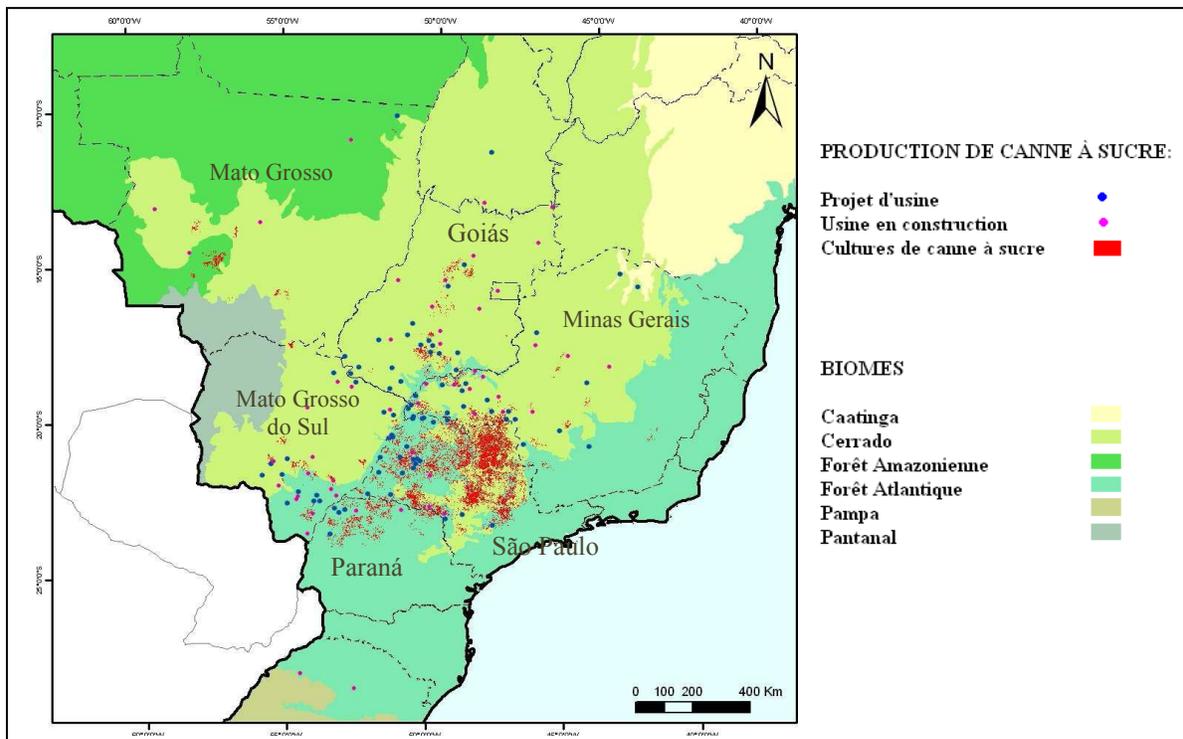


Figure 2.6 Localisation des plantations de canne à sucre par rapport aux principaux biomes du Brésil et localisation des projets d'usines de sucre et d'éthanol

Traduction libre
Modifié de : WWF-Brazil (2008). p. 21

2.9 Les impacts de l'expansion de la canne à sucre sur la biodiversité

Au niveau international, la conversion de milieux naturels au profit des terres agricoles, notamment à cause de la demande en agrocarburants, est la principale menace qui plane sur la biodiversité des écosystèmes terrestres :

« La perte et la dégradation des habitats constituent la plus forte source de pression exercée sur la diversité biologique à l'échelle mondiale. Dans les écosystèmes terrestres, la perte d'habitats est essentiellement due à la conversion des espaces naturels en terres agricoles, lesquelles représentent désormais près de 30 % des zones terrestres à l'échelle mondiale. Dans certaines régions, cette conversion est en partie le résultat de la demande en agrocarburants. » (SCDB, 2010, p.55)

Au Brésil, l'expansion présente et passée des cultures de canne à sucre pour la production d'éthanol exerce deux types d'impacts négatifs sur la biodiversité. D'une part, un impact direct qui consiste en la conversion des écosystèmes indigènes en plantations de canne à sucre. D'autre part, il existe un impact indirect aussi appelé les changements indirects dans l'affectation des terres. Ces changements indirects sont occasionnés par l'expansion des cultures de canne à sucre aux dépens des terres cultivées qui peut conduire indirectement à la conversion des écosystèmes dans d'autres régions du Brésil. En fait l'occupation accrue du territoire agricole par la canne à sucre peut pousser les pâturages et les autres cultures aux frontières des écosystèmes et ainsi mener à la conversion des espaces naturels.

À l'époque de la colonisation, l'introduction de la canne à sucre sur le territoire brésilien a causé des impacts directs sur la biodiversité de la forêt atlantique. Lors des 16^e et 17^e siècles, l'expansion des cultures, des pâturages et l'exploitation forestière ont eu des effets désastreux sur le biome (Rodrigues et Ortiz, 2006). La négligence environnementale était telle que jusqu'à la fin du 19^e siècle, au lieu d'utiliser la bagasse pour alimenter les chaudières des usines de sucre (la pratique usuelle dans les Caraïbes), la pratique courante au Brésil était de couper des arbres pour utiliser le bois comme combustible (WWF-Brazil, 2008).

Actuellement, une grande partie des cannaies du Brésil se situent dans des zones occupées anciennement par la forêt atlantique (voir figure 2.6).

Dans les années 70 et 80, l'expansion motivée par le *Proalcool* s'est exercée principalement dans la région du Centre-Sud au détriment de pâturages et de cultures vivrières (Rodrigues et Ortiz, 2006; WWF-Brazil, 2008; Goldemberg *et al.*, 2008). Selon Rodrigues et Ortiz (2006), durant cette période, la plupart des nouvelles cannaies n'ont pas été établies au détriment de zones boisées et de prairies naturelles par un processus classique d'agriculture sur brûlis. La canne à sucre a plutôt été plantée sur des terres préalablement défrichées par des petits agriculteurs. Toutefois, à la suite du remplacement des cultures vivrières et des pâturages par des monocultures de canne à sucre, il y a eu une diminution marquée des Aires de préservation permanente et des Réserves forestières légales résultant d'un non-respect croissant de l'industrie envers la législation forestière (WWF-Brazil, 2008). Très souvent, les fragments forestiers et les zones affectées par le brûlage des cultures sont déboisées, ce qui permet aux plantations de s'étendre et d'atteindre le rivage des cours d'eau (WWF-Brazil, 2008).

Dorénavant, les nouvelles restrictions du *ZAE Cana* viennent limiter les impacts directs éventuels que pourrait exercer l'expansion de la canne à sucre sur la biodiversité en resserrant les normes en matière de préservation des écosystèmes. Grâce aux nouvelles normes, il ne sera plus possible d'étendre les cannaies au détriment de la végétation native et l'expansion des cultures sera notamment interdite dans les biomes de l'Amazonie et du pantanal. En outre, le gouvernement interdit l'établissement de nouvelles plantations de canne à sucre dans le bassin versant du Haut-Paraguay, ce qui correspond à une grande partie du bassin versant du pantanal. Cette zone est connue historiquement pour être une source de pollution pour les écosystèmes du pantanal (WWF, 2001). Toutefois, il est important de noter que les producteurs sont toujours autorisés à étendre leur culture aux terres dégradées et aux pâturages se situant à l'intérieur du cerrado. La grande majorité des terres ciblées par le *ZAE Cana* se situent effectivement à l'intérieur de ce biome (voir EMBRAPA, 2009). Ainsi, les plantations

peuvent occuper des zones prioritaires pour la conservation et la revitalisation des terres dégradées de l'écosystème du cerrado (Machado *et al.*, 2006).

Les impacts indirects de l'expansion des cultures de cannes sur la biodiversité peuvent être importants et doivent être considérés. Environ 36 % des pâturages du Brésil se retrouvent actuellement dans la région amazonienne, la seule région du Brésil qui a connu une augmentation des superficies de pâturages durant les deux dernières décennies (Barreto *et al.*, 2008 et IBGE, 2009 cités dans Lapola *et al.*, 2010). Ce phénomène suggère que l'expansion des terres cultivées dans d'autres régions du Brésil pousse les pâturages aux frontières de la forêt amazonienne (Lapola *et al.*, 2010). D'autre part, le taux annuel constant de déforestation constaté dans le cerrado suggère que des changements indirects dans l'affectation des terres pourraient aussi survenir dans le centre du Brésil, et ce, malgré le fait que la région enregistre une diminution des pâturages (résumé dans Lapola *et al.*, 2010).

En fait, la demande croissante de terres agricoles pour la production d'éthanol accroît la concurrence entre les différents secteurs agricoles pour l'utilisation de la terre. Comme il a été mentionné précédemment, la présente expansion s'effectuera au détriment de pâturages et de terre dégradés. La disponibilité des terres agricoles est un élément limitant dans certaines régions du Brésil. L'augmentation importante qu'a enregistré le prix de la terre dans certaines régions témoigne de ce phénomène (Martines-Filho *et al.*, 2008). Les éleveurs pourront jusqu'à une certaine limite compenser cette perte de superficies agricoles par l'augmentation de la densité de leurs élevages (voir Lapola *et al.*, 2010). Il n'en demeure pas moins que ces changements dans l'affectation de terres risquent de repousser les pâturages dans des secteurs occupés par des écosystèmes indigènes et par le fait même causer la destruction des écosystèmes. Une étude de Lapola *et al.* (2010) a estimé par le biais de la modélisation les changements indirects dans l'utilisation des terres causés par l'expansion de la canne à sucre pour la production d'éthanol. Selon cette étude, les changements d'affectation des terres pourraient occasionner d'ici 2020 la destruction de près de 50 000 km² d'écosystèmes

forestiers et de 19 000 km² d'autres écosystèmes indigènes du Brésil. La modélisation effectuée par Lapola *et al.* (2010) prend en considération une augmentation de la densité des élevages de 0,09 tête par hectare, et ce, pour la totalité des pâturages du Brésil.

La production d'éthanol peut entraîner des impacts négatifs sur la biodiversité. Comme il a été mentionné précédemment, le changement d'affectation des terres qu'induit l'expansion des cultures de canne pourrait mener à la conversion et à la destruction d'écosystèmes. De plus, la production de l'éthanol peut entraîner d'autre type d'impacts sur la biodiversité (Smeets *et al.*, 2006). Par exemple, l'utilisation des produits agrochimiques et des fertilisants dans les cannaies, ainsi que le brûlage des plantations, peuvent conduire à une dégradation des écosystèmes terrestres et aquatiques avoisinants les cannaies (révisé dans le présent chapitre). En convertissant de nombreux écosystèmes terrestres en terres agricoles, la biodiversité s'effrite et les biens et services écosystémiques peuvent être compromis. La dégradation et la destruction des écosystèmes riverains, tel que mentionné précédemment (section 2.7.4), est un exemple criant du déclin d'un service écosystémique de régulation et de l'importance économique que peut représenter la conservation de la biodiversité.

Enfin, Le suivi des changements directs et indirects dans l'affectation des terres est d'une importance capitale pour l'industrie de l'éthanol. En fait, ces changements peuvent altérer de façon marquée l'efficacité du biocarburant. En causant directement ou indirectement la destruction des écosystèmes, le bilan de carbone de l'éthanol peut être modifié. La détérioration des milieux naturels altère les biens et services rendus par la nature et peut compromettre par le fait même le bien-être des populations humaines (voir MEA, 2005).

2.10 Le bilan énergétique et les émissions de gaz à effet de serre de l'éthanol

La réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est l'un des principaux objectifs environnementaux liés à l'utilisation et à la production d'éthanol. En fait,

l'agrocarburant doit demander moins d'énergie à produire qu'il n'en fournit lors de sa combustion et doit émettre moins de GES que le combustible fossile qu'il remplace. Théoriquement, les biocarburants sont produits à base de la biomasse végétale et ils devraient avoir un effet neutre sur les émissions de carbone. En principe, la combustion de l'éthanol ne fait que renvoyer dans l'atmosphère le carbone que la plante a préalablement capté lors de sa croissance. D'un autre côté, les combustibles fossiles libèrent dans l'atmosphère du carbone qui a été emprisonné pendant des millions d'années dans l'écorce terrestre.

Toutefois, afin d'évaluer le véritable avantage de remplacer la gazoline par l'éthanol, il est nécessaire d'effectuer une analyse complète du cycle de vie de la production de l'agrocarburant. Les différentes activités agricoles, industrielles et commerciales impliquées dans la production de l'éthanol peuvent causer des émissions de gaz à effet de serre non négligeables. Ces émissions peuvent venir changer de façon marquée le bilan théoriquement neutre des émissions du biocarburant. À titre d'exemple, les changements d'affectation des terres induits de façon directe ou indirecte par l'expansion de terres agricoles peuvent avoir une importance considérable sur les émissions de carbone des biocarburants. Le carbone qui est séquestré dans la végétation et dans le sol peut-être est libéré lorsque le territoire est converti en terres agricoles. Ces émissions se produisent au début du cycle de production et, si elles sont importantes, de nombreuses années peuvent être nécessaires avant qu'elles ne soient compensées par les économies d'émissions que procure le biocarburant (FAO, 2008a).

2.10.1 Le bilan énergétique

Macedo *et al.* (2008) ont conduit récemment une étude complète portant sur la balance énergétique et les émissions de GES de la production d'éthanol au Brésil. Cette étude a été menée durant la saison 2005-2006, durant laquelle les chercheurs ont recueilli les données de 44 usines situées dans le Centre-Sud brésilien. Ils ont étudié le cycle de vie complet de l'éthanol, de la plantation des cultures jusqu'à la production du carburant. L'efficacité

énergétique d'un biocarburant est évaluée grâce au calcul du ratio énergétique. Ce ratio est obtenu en divisant la somme des énergies renouvelables produites par la somme des énergies fossiles utilisées pour produire le biocarburant. Selon les calculs de Macedo *et al.* (2008), le ratio énergétique de la production d'éthanol au Brésil est de 9,3 et ce ratio devrait atteindre près de 11,6 à l'horizon 2020. Le ratio énergétique de l'éthanol brésilien est nettement supérieur à celui de l'éthanol produit à base de maïs aux États-Unis qui est d'environ 1,4 (Goldemberg *et al.*, 2008). Cependant, le calcul de Macedo *et al.* (2008) ne prend pas en compte l'énergie utilisée pour le transport outre-mer du carburant. Lorsque le transport est considéré dans le calcul, on peut obtenir des ratios moins élevés s'approchant de 5 (Rodrigues et Ortiz, 2006).

Le ratio énergétique élevé de l'éthanol brésilien est dû principalement à l'utilisation de la bagasse comme source d'énergie dans les distilleries. En fait, ce déchet organique provenant de la canne à sucre est brûlé dans des chaudières et l'énergie ainsi produite procure l'électricité et la chaleur nécessaires pour alimenter le processus de fabrication de l'éthanol. Grâce à ce biocombustible, de nombreuses usines sont énergétiquement autonomes et vont jusqu'à vendre des surplus d'énergie au réseau public d'électricité. D'un autre côté, l'industrie brésilienne prévoit une amélioration de l'efficacité énergétique d'ici l'an 2020 (Smeets *et al.*, 2008). Ce progrès sera dû principalement à l'augmentation de la disponibilité en biomasse. En fait, la diminution graduelle du brûlage de la canne à sucre pour la récolte rendra de plus en plus de résidus de canne à sucre (feuilles) disponibles. Ces résidus s'ajouteront à la bagasse pour la production d'énergie dans les distilleries, il en résultera donc une plus grande efficacité et autonomie énergétique pour les industries.

2.10.2 Les émissions de gaz à effet de serre

En ce qui concerne les émissions de GES, il est estimé que les émissions atmosphériques occasionnées par la combustion de l'éthanol sont de 417 kgCO₂ eq/ m³ (masse de CO₂ émis

pour la combustion d'un mètre cube d'éthanol) pour l'éthanol hydraté et de 436 kgCO₂ eq/ m³ pour l'éthanol anhydre (Macedo *et al.*, 2008). En fait, selon Macedo *et al.* (2008), la combustion d'un litre d'éthanol émettrait de 75 % à 90 % moins de GES comparativement à la combustion d'un litre d'essence. Par contre, les calculs d'émissions de GES effectués par Macedo *et al.* (2008) ne tiennent pas compte des émissions causées par les changements directs et indirects d'affectation des terres et par la perte de carbone organique du sol. En effet, il convient de noter que depuis l'implantation du *Proalcool* l'essentiel de l'augmentation de la production de canne à sucre a eu lieu au détriment de pâturages, mais les impacts indirects et induits de la production de la canne peuvent conduire également à la conversion et à la dégradation de la végétation indigène (voir section 2.9). Les pâturages et les écosystèmes naturels sont des systèmes contenant une quantité importante de carbone séquestré dans la biomasse des végétaux et dans le sol (voir Smeets *et al.*, 2008). Selon Fargione *et al.* (2008), la biomasse végétale et la biomasse du sol sont les deux plus grandes réserves de carbone terrestre et ensemble, ils contiennent environ 2,7 fois plus de carbone que l'atmosphère. Évidemment, la conversion des écosystèmes en terres agricoles pourrait entraîner des émissions supplémentaires de GES par la libération du carbone stocké dans ces systèmes.

Le carbone organique du sol (COS) est le carbone séquestré dans la litière, les débris de végétaux et la matière organique du sol. Habituellement, les écosystèmes naturels ainsi que les pâturages contiennent une plus grande quantité de COS que les monocultures de canne à sucre. Ainsi, la conversion de ces systèmes en cultures de canne à sucre résulte très souvent en une diminution du COS. Diverses études ont tenté d'évaluer la quantité de carbone qui peut être libérée lors de la conversion de pâturage et du cerrado en monocultures de canne à sucre (résumé dans Smeets *et al.*, 2008). Selon certaines travaux, la conversion du cerrado en terres agricoles peut occasionner une perte de plus ou moins 10 % du stock de carbone contenu dans le sol (Bayer *et al.*, 2006; Zinn *et al.*, 2005). En ce qui concerne la conversion de pâturages en production de cannes à sucre, Silveira *et al.*, (2000) ont calculé une perte de 22 % du stock de carbone organique du sol. Il semblerait que les pertes de COS causées par la production de la

canne à sucre modifient nettement le bilan d'émission de GES de l'éthanol. À titre d'exemple, la perte de 10 % du COS causé par la conversion du cerrado en cultures de canne équivaut à une émission supplémentaire de 237 kgCO₂ eq/ m³ d'éthanol soit à une augmentation d'environ 63 % des émissions de GES pendant une période de 20 ans (Smeets *et al.*, 2008). Freitas *et al.* (2000 cité dans Smeets *et al.*, 2008) suggèrent que des résidus de canne à sucre laissés sur le sol sont indispensables pour maintenir le COS. Cela soulève la question à savoir si la réduction des émissions de GES obtenue par l'utilisation des déchets de canne pour la cogénération d'électricité n'est pas égale ou inférieure aux émissions causées par la perte du COS.

Un autre impact qui n'est pas pris en compte dans le calcul de Macedo *et al.* (2008) est la conversion directe et indirecte des écosystèmes indigènes pour la production de la canne à sucre. Les écosystèmes sont des milieux pouvant capter et séquestrer des quantités impressionnantes de gaz carbonique qui est le principal GES. En ce sens, la séquestration du carbone est un service écosystémique de régulation de premier ordre puisqu'en stockant le carbone atmosphérique, les écosystèmes contribuent à la régulation du climat à l'échelle globale. Grâce au processus de la photosynthèse, les végétaux utilisent le gaz carbonique de l'atmosphère pour synthétiser les molécules nécessaires à leur bon fonctionnement. Ainsi, le carbone se voit séquestrer dans la biomasse des végétaux présents dans les écosystèmes. Comme il a été démontré précédemment, au Brésil, l'expansion des cultures de canne à sucre peut causer indirectement à la perte d'écosystèmes forestiers (Lapola *et al.*, 2010; Smeets *et al.*, 2008). Ces changements indirects occasionnent des émissions supplémentaires de GES qui peuvent venir compromettre l'efficacité de l'éthanol.

Un exemple d'émissions de GES causées par la déforestation a été mis en évidence par Smeets *et al.* (2008). Dans cet exemple, les chercheurs affirment qu'un hectare de forêt tropicale humide décidue (écosystème commun dans l'État de São Paulo) contient en moyenne 90 tonnes de biomasse. La conversion de cet hectare de forêt en culture de canne à sucre

résulterait en l'émission de 1 112 kgCO₂ eq/ m³ d'éthanol (en assumant que tout le carbone contenu dans la biomasse est dégagé sous forme de CO₂ sur une période de cinquante ans). Ceci augmenterait les émissions de GES de la combustion de l'éthanol d'environ 250 % durant cette période.

Fargione *et al.* (2008) ont introduit la notion de « dette en carbone » liée au changement d'affectation des terres. La dette de carbone est la quantité de gaz carbonique émis durant une période de 50 ans suivant le changement d'affectation de la terre. Selon Fargione *et al.* (2008) la « dette en carbone » de la conversion d'un hectare du cerrado correspond à 165 tonnes de CO₂ et il faudrait environ 17 ans avant que les économies de carbone (par rapport à l'essence) que procure l'éthanol produit sur cet hectare ne compensent pour le carbone émis. Il est important de souligner qu'avec les nouvelles normes du *ZAE Cana*, il sera interdit de convertir des écosystèmes indigènes du Brésil en cultures de canne à sucre. Toutefois, selon Lapola *et al.* (2010) les changements indirects dans l'affectation des terres pourraient compromettre considérablement les bilans d'émissions de GES des biocarburants, principalement en repoussant la frontière des pâturages à l'intérieur du cerrado et de la forêt amazonienne. Comme il a été mentionné précédemment, l'expansion des monocultures de canne à sucre pour la production d'éthanol pourrait mener indirectement à la destruction de 69 000 km² d'écosystèmes indigènes d'ici 2020 (Lapola *et al.*, 2010). Selon ces auteurs, il faudrait environ 40 ans avant que les économies de carbone que procure l'éthanol ne compensent pour le carbone émis par le déboisement des quelques 69 000 km². Toutefois, il est possible d'éviter les changements indirects d'affectation des terres causés par l'éthanol en diminuant la demande de superficies pour les pâturages. Pour ce faire, les éleveurs du Brésil devraient augmenter la densité des élevages de 0,13 tête de bétail/hectare par rapport aux valeurs de 2003 (Lapola *et al.*, 2010). Toutefois, la situation foncière en Amazonie ne semble pas favoriser l'intensification des pâturages. L'acquisition d'animaux est fortement subventionnée au Brésil et dans de nombreux cas, les agriculteurs maintiennent la densité de leur élevages à

un niveau minimum, ce qui leur permet de garantir leur droit de propriété envers les terres publiques (Lapola *et al.*, 2010).

En général, les méthodes qui sont utilisées pour réaliser les analyses des cycles de vie des biocarburants ne tiennent pas compte du problème complexe du changement d'affectation des terres. Il a été démontré précédemment que la prise en compte des émissions supplémentaires de GES causées par de la perte du COS et par le changement d'affectation de terres peut modifier complètement le bilan d'émissions de GES de l'éthanol. De nouvelles études plus complètes tenant compte de tous les impacts directs et indirects de la production de l'éthanol sont nécessaires afin d'avoir une vision plus juste des quantités de GES réellement émises lors de la production et de l'utilisation de l'éthanol.

Chapitre 3

Les coûts sociaux de l'éthanol brésilien

Lors de l'implantation du *Proalcool*, le gouvernement brésilien avait comme objectif secondaire de promouvoir le développement national par la création de nouveaux emplois. Depuis la mise en place du programme, l'industrie de l'éthanol et du sucre a été responsable de la création de plus d'un million d'emplois directs, dont la moitié sont impliqués dans la production de la canne à sucre (Walter *et al.*, 2008). De toute évidence, les biocarburants bon marché peuvent favoriser le développement économique des pays du sud, mais ce développement s'effectue à quel coût social? Au Brésil, de nombreux problèmes sociaux semblent être liés à l'industrie de l'éthanol et à la culture de la canne à sucre. Les mauvaises conditions de travail dans les cannaies, les problèmes de santé publique, la sécurité alimentaire et l'accès à la terre pour les pauvres sont les principaux enjeux sociaux actuellement étudiés autant au Brésil qu'ailleurs (voir Uriarte *et al.*, 2009; Smeets *et al.*, 2008; Martinelli et Filoso, 2008). Ces questions sont d'autant plus importantes qu'au Brésil de nombreuses personnes vivent dans des conditions sociales précaires. Selon les plus récentes données du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD, 2010), le Brésil fait partie des pays ayant une des plus grandes inégalités économiques du monde. De plus, selon la FAO (2009b), près de 12 millions de Brésiliens souffrent de la faim.

3.1 L'exploitation des coupeurs de canne à sucre

Selon Rodrigues (2006 cité dans Martinelli et Filoso, 2008), les conditions de travail des coupeurs de cannes à sucre sont très semblables à celles que l'on retrouvait au temps de l'esclavage, il y a de cela près de 200 ans. De plus, une grande partie des coupeurs de canne sont des travailleurs saisonniers provenant de régions pauvres du Nord-Est. Ils migrent

temporairement dans les régions sucrières du Centre-Sud pour y travailler de 6 à 8 mois durant la saison des récoltes. Généralement, ces travailleurs ruraux possèdent un très faible niveau d'éducation (Rocha *et al.*, 2007) et ne détiennent pas de documents de travail, ce qui en fait un groupe très vulnérable (Mendonça, 2006). Venant de loin et n'ayant pas d'autres options, les travailleurs migrants sont souvent contraints à demeurer dans des logements inadéquats durant la saison des récoltes (Martinelli et Filoso, 2008). En outre, une récente étude de Carneiro *et al.* (2008) montre qu'une grande insécurité alimentaire règne au sein des familles des travailleurs ruraux saisonniers.

3.1.1 Les conditions de travail

La récolte manuelle de la canne à sucre est un travail extrêmement difficile qui comporte de nombreux risques de blessures. Une journée type de travail consiste à passer plus de huit heures de travail aux champs à respirer la fumée et la poussière provenant des résidus calcinés de canne à sucre (Rodrigues, 2006 cité dans Martinelli et Filoso, 2008). La récolte est effectuée lors de périodes de l'année où la température oscille entre 23 °C et 36 °C (Rocha *et al.*, 2007), ce qui rend évidemment tout effort physique difficile. Dans les champs, les travailleurs ne disposent que très rarement de toilettes et d'approvisionnement en eau potable (Martinelli et Filoso, 2008). En plus des mauvaises conditions de travail, les coupeurs de canne font face à une charge de travail très élevée. En 1950, un ouvrier coupait en moyenne trois tonnes de canne à sucre par jour (Alves *et al.*, 2006). Plus récemment, la récolte mécanisée est devenue la référence en matière de quantité journalière de canne à couper. Conséquemment, la charge de travail est passée de six tonnes journalières en moyenne en 1980 à 12, voire 15 tonnes aujourd'hui dans certains cas (Smeets *et al.*, 2008). Pour chaque six tonnes coupée, il est estimé qu'un coupeur de canne donne approximativement 70 000 coups de machette et marche une distance de 4,5 km (Alves *et al.*, 2006).

La charge de travail élevée et les mauvaises conditions de travail sont responsables de nombreux problèmes de santé (Rocha *et al.*, 2007) et peuvent même entraîner la mort (Alves

et al., 2006). Les mouvements répétitifs et l'effort physique soutenu qu'exige la récolte provoquent des tendinites, des problèmes lombaires et des crampes musculaires causées par la perte excessive de potassium (résumé dans Smeets *et al.*, 2008; voir aussi Rocha *et al.*, 2007). De fréquents spasmes suivis par des étourdissements, des céphalées et des vomissements sont des symptômes courants associés à la surcharge de travail que les coupeurs de canne nomment *birola* (Mendonça, 2006). Par ailleurs, la coupe de la canne à sucre est souvent associée au cancer causé par la suie qui provient du brûlage de la canne et par les produits agrochimiques qui sont épandus dans les champs (Smeets *et al.*, 2006). Seulement pour l'année 1998, les produits agrochimiques auraient été responsables de près de 700 empoisonnements et de 15 morts chez les travailleurs de la canne à sucre (Csillag et Zorzetto, 2000 cité dans Smeets *et al.*, 2008). Plus récemment, soit de 2004 à 2007, dix-huit coupeurs de cannes à sucre, tous des travailleurs migrants, sont décédés et ont été recensés seulement pour l'État de São Paulo. Dans la moitié des cas, il s'agit de morts subites, causées par des arrêts cardiaques ou des problèmes respiratoires. En ce qui concerne l'autre moitié, la cause du décès n'est pas connue. Il est à noter que tous les décès sont survenus chez des travailleurs ayant moins de 55 ans et que la moitié d'entre eux avait moins de 40 ans. Selon Alves *et al.* (2006), la plupart de ces pertes pourraient être attribuées à la charge de travail élevée et aux mauvaises conditions de travail. Selon certains, ces quelques décès recensés représentent un échantillon non représentatif de tous les morts de travailleurs qui peuvent survenir clandestinement et qui sont cachés par l'industrie (Alves *et al.*, 2006).

Il existe au Brésil une législation étendue en matière de conditions de travail, de nombre maximum d'heures de travail et de règles de sécurité (Smeets *et al.*, 2006). Ces normes sont fixées par le Ministère du Travail et sont conformes aux standards internationaux établis par l'Organisation internationale du travail (OIT). La loi brésilienne limite la durée de la semaine de travail à 44 heures et prévoit une période de repos hebdomadaire de 24 heures consécutives, de préférence le dimanche. La loi interdit également les heures supplémentaires excessives obligatoires et stipule que les heures travaillées au-dessus de la limite hebdomadaire doivent être compensées à temps et demi du salaire (résumé dans Smeets *et al.*, 2006). En général, les

conditions de travail des coupeurs de canne ne sont pas conformes avec les normes nationales du travail. Selon Smeets *et al.* (2006), le gouvernement n'attribue pas suffisamment de ressources pour une inspection adéquate et pour une application rigoureuse de ces standards.

3.1.2 Le travail des enfants

Selon la définition de l'OIT, le travail des enfants est lié au travail effectué par des jeunes ayant moins de 16 ans. Le travail des enfants est un phénomène très répandu au Brésil et plus particulièrement dans le secteur de l'agriculture. Selon Schwartzman et Schwartzman (2004), sur les 6,3 millions de jeunes de 16 ans et moins travaillant au Brésil, 2,3 millions d'entre eux travailleraient en agriculture. Le nombre d'enfants ayant entre 10 et 17 ans travaillant à la production de la canne à sucre est estimé à 23 000 (Schwartzman et Schwartzman, 2004) et compterait pour environ 3 % des travailleurs impliqués dans la culture de la canne à sucre au pays (Smeets *et al.*, 2008).

Actuellement, la loi brésilienne fixe l'âge minimum requis pour travailler à 16 ans, quoiqu'à certaines conditions, les jeunes de 14 ans sont autorisés à travailler. Par contre, la loi interdit aux jeunes de moins de 18 ans d'effectuer un travail exigeant au point de vue physique ou encore d'occuper un travail nocturne, insalubre ou dangereux (révisé dans Smeets *et al.*, 2006). Ces restrictions confirment que légalement, il est interdit aux jeunes brésiliens de moins de 18 ans de travailler dans les champs de canne à sucre. Malgré cette réalité, les inspections sur le travail des enfants ne sont pas menées sur une base régulière par les autorités brésiliennes (Smeets *et al.*, 2006). La plupart des inspections sont menées à la suite de plaintes provenant de travailleurs, de professeurs, d'organisations non gouvernementales et des médias (USDS, 2006). Afin d'être conforme avec la loi, le travail des enfants doit être éradiqué par les producteurs de canne à sucre. Toutefois, il est important de comprendre que dans la plupart des cas, les enfants sont contraints de travailler en raison des conditions de vie difficiles dans lesquelles ils vivent. Dans cette optique, la perte d'emploi chez ces enfants pourrait causer une dégradation de leur situation sociale par la perte de revenu. Très souvent, les conditions

sociales et économiques précaires dans lesquelles vivent ces enfants obligent ces derniers à occuper un travail afin de subvenir à leurs besoins de base et à ceux de leurs familles.

Définitivement, le travail des enfants ne peut être éradiqué sans que des mesures ne soient mises en place afin d'améliorer leur condition sociale. Il est clair que l'établissement de mesures permettant de stopper cette pratique entraînerait une hausse du coût de production de l'éthanol. Smeets *et al.* (2005) ont développé une méthode de calcul permettant d'évaluer le coût théorique de la prévention du travail des enfants dans les cannaies. Cette méthode implique deux types de mesures. La première mesure consiste à indemniser les parents pour la perte de revenus familiaux associés à l'arrêt du travail de leurs enfants. Pour ce qui est de la seconde mesure, les parents sont indemnisés pour les coûts associés à l'éducation de leurs enfants. Ainsi, les enfants sont assurés d'avoir les ressources financières nécessaires leur permettant de fréquenter l'école sans avoir besoin de travailler (voir Smeets *et al.*, 2005). Selon Smeets *et al.* (2008), l'instauration de telles mesures augmenterait le coût de production de l'éthanol de 4 %.

3.1.3 Le salaire des coupeurs de canne à sucre

Les coupeurs de canne à sucre sont payés à la production et donc leur salaire est en fonction de leur rendement journalier. En d'autres mots, les coupeurs de canne à sucre sont payés en fonction de la masse des tiges récoltées pendant leur journée de travail. La masse est estimée en fonction de la distance linéaire de canne que le travailleur a coupée. À l'aide de calculs, les employeurs convertissent la distance linéaire en surface puis en masse. Les calculs sont effectués à l'aide de valeurs de référence préalablement établies avant la saison des récoltes. Le principal problème avec cette méthode est que la masse de canne à sucre peut varier en fonction des conditions locales, et que les calculs ont tendance à sous-évaluer la masse récoltée (Martinelli et Filoso, 2008). Selon Alves *et al.* (2006), avec cette méthode de calcul, les travailleurs sont régulièrement sous-payés pour le travail effectué. Afin de compenser le

faible salaire, les travailleurs tentent de maximiser leur salaire journalier en augmentant leur rendement, en travaillant de longues heures dans des conditions inappropriées (Martinelli et Filoso, 2008).

Généralement, les coupeurs reçoivent un salaire s'approchant de 1,20 dollar américain par tonne de canne à sucre coupée (Martinelli et Filoso, 2008). Ainsi, pour une moyenne de 10 tonnes coupées par jour le travailleur reçoit l'équivalent de 12 dollars américains. En assumant que les coupeurs travaillent environ 24 jours par mois, le salaire mensuel d'un coupeur de canne à sucre se situe aux alentours de 300 USD, ce qui équivaut à environ 550 reais (R\$, monnaie du Brésil). Pour l'année 2009, le salaire mensuel minimum nominal au Brésil (salaire minimum en vigueur) a été fixé à 465 R\$ (DIEESE, 2009). Ainsi, les coupeurs de canne gagnent un salaire mensuel équivalent à environ 1,2 fois le salaire minimum, pour une période maximale de huit mois pendant la saison des récoltes. Lorsque leurs revenus sont redistribués sur une année complète, les coupeurs gagnent mensuellement un salaire équivalant à 0,8 fois le salaire minimum nominal. Malgré le fait qu'habituellement, sur une base mensuelle, les salaires octroyés aux coupeurs sont pratiquement égaux au salaire minimum nominal, il importe de savoir si ces revenus sont suffisants pour permettre un niveau de vie décent et pour éviter la pauvreté.

Actuellement, aucune norme nationale délimitant le seuil de pauvreté n'a été établie par le gouvernement brésilien, ce qui est dû principalement aux grandes variations régionales des salaires et du coût de la vie (Smeets *et al.*, 2006). Par contre, le Programme bourse familiale (PBF du portugais *Progama Bolsa Familia*), qui fournit une aide financière aux familles pauvres du Brésil, définit certains critères de l'état de pauvreté pour l'attribution de ses bourses. En 2009, le gouvernement brésilien a établi de nouveaux seuils pour l'attribution des bourses par le biais du Décret présidentiel no 6.917. Selon ces derniers critères, en 2009, une condition d'extrême pauvreté est définie par une famille (deux adultes et deux enfants) qui reçoit un revenu familial inférieur à 60 % du salaire minimum nominal et la pauvreté est

définie par une famille qui reçoit un revenu familial entre 60 % et 120 % du salaire minimum nominal. Ainsi, une famille qui possède comme seul revenu un salaire de coupeur de canne, soit un revenu entre 80 % et 120 % du salaire minimum, est considérée comme pauvre et peut théoriquement avoir accès à une aide financière de dernier recours de la part du gouvernement.

Évidemment, des salaires plus élevés accompagnés de meilleures conditions de travail procureraient aux coupeurs de canne une meilleure qualité de vie. Sur une base mensuelle, le Département intersyndical de statistique et d'études socio-économiques du Brésil (DIEESE) calcule mensuellement le « salaire minimum nécessaire »¹. Le salaire minimum nécessaire est un revenu permettant à une famille de deux adultes et deux enfants de subvenir financièrement à leurs besoins de base. Au courant de l'année 2009, les salaires minimums nécessaires calculés par le DIEESE équivalaient en moyenne à 4,4 fois le salaire minimum. Afin de rendre la production d'éthanol socialement plus acceptable, il pourrait être envisageable pour les industriels de fournir des salaires plus élevés. Par exemple, en octroyant des salaires s'approchant du salaire minimum essentiel calculé par le DIEESE (2009), les employeurs seraient assurés que leurs travailleurs soient en mesure de répondre aux besoins de base d'une famille brésilienne moyenne.

Toutefois, il est clair qu'une telle augmentation salariale aurait comme effet de faire grimper le coût de production de l'éthanol. Une augmentation faisant passer les salaires d'un ordre de 0,8 à 4,4 fois le salaire minimum soit au niveau du salaire minimum nécessaire moyen de 2009 entraînerait une augmentation du coût de production de l'éthanol de 36 %. Ce calcul a été effectué selon la méthode utilisée par Smeets *et al.* (2006). Dans ce calcul, il est assumé qu'entre 21 % et 24 % du coût de production de la canne correspond au coût de la main-d'œuvre et 60 % de cette proportion correspond au salaire des coupeurs de canne à sucre. La

¹ Le salaire minimum nécessaire est défini conformément à un précepte constitutionnel en tant que: "le salaire minimum fixé par la loi, unifié à travers le pays, en mesure de combler les besoins vitaux de base tels que le logement, la nourriture, l'éducation, la santé, les loisirs, les vêtements, l'hygiène, le transport, la sécurité sociale, et est périodiquement mis à jour pour préserver le pouvoir d'achat" (Constitution brésilienne, chapitre II, Droits sociaux, article 7; DIEESE, 2009).(traduction libre)

culture et la récolte de la canne à sucre compte pour 60 % du coût total de production de l'éthanol (voir Smeets *et al.*, 2006). Le salaire des coupeurs de canne à sucre correspond donc à environ 8 % du coût de production de l'éthanol.

3.2 La santé publique : les maladies respiratoires

Comme il a été mentionné au chapitre 2, la combustion de la biomasse est reconnue pour être une source importante de particules solides en suspension en milieu tropical (Crutzen et Andreae, 1990). Durant la saison des récoltes, les concentrations de particules en suspension peuvent atteindre jusqu'à trois fois la concentration tolérée par la loi brésilienne (voir chapitre 2 section 2.4). D'après une étude de Mazzoli-Rocha *et al.* (2008), les particules solides en suspension provenant du brûlage de la canne à sucre peuvent être responsables de problèmes respiratoires et sont au moins aussi toxiques que les particules produites par le trafic urbain et les industries.

Des études épidémiologiques menées dans deux régions urbaines de São Paulo (Paracicaba et Araraquara) ont démontré que les concentrations élevées de particules solides en suspension provenant du brûlage des champs sont susceptibles d'aggraver l'état de santé de nombreuses personnes (Cançado *et al.*, 2006; Arbex *et al.*, 2007). Les zones urbaines étudiées sont entourées par des cultures de canne à sucre. Les études d'Arbex *et al.* (2007, 2000), menées dans la région de Paracicaba, ont démontré que durant la saison des récoltes, il existe une corrélation significative positive entre le nombre d'admissions quotidiennes à l'hôpital pour des maladies respiratoires et la concentration de particules en suspension. Des résultats semblables ont été obtenus par Cançado *et al.* (2006) dans la région sucrière d'Araraquara. Ces derniers auteurs ont découvert une corrélation significative entre la concentration atmosphérique de PM₁₀ (particules solides en suspension $\leq 10 \mu\text{m}$) et de PM_{2,5} (particules solides en suspension $\leq 2,5 \mu\text{m}$) et le nombre d'admissions à l'hôpital d'enfants et de personnes âgées. Les PM₁₀ et les PM_{2,5} sont des particules considérées comme potentiellement

nocives pour la santé humaine puisqu'elles pénètrent profondément dans les poumons et peuvent atteindre le système respiratoire inférieur (American Thoracic Society, 1996 cité dans Cançado *et al.*, 2006).

Encore jusqu'à tout récemment, aucune étude n'avait tenté d'évaluer les impacts des feux de cannes à sucer sur la santé à plus grande échelle. Une étude récente d'Uriarte *et al.* (2009) a été conduite à l'échelle de l'État de São Paulo et a analysé les effets du brûlage de la canne à sucre sur la santé respiratoire des enfants et des personnes âgées. Cette étude vient appuyer les découvertes faites précédemment par Cançado *et al.* (2006) et Arbex *et al.* (2007, 2000). Les résultats de cette recherche démontrent que le brûlage des champs conduit à une plus grande concentration de polluants atmosphériques. Pour les municipalités de l'État de São Paulo qui possèdent des cultures de canne à sucre sur plus de 50 % de leur territoire, environ 15 % des cas de maladies respiratoires chez les personnes âgées peuvent être attribuables au brûlage de la canne. En ce qui concerne les enfants, 38 % des cas de maladies respiratoires peuvent être causés par l'exposition courante ou chronique à la fumée de canne à sucre dans ces municipalités.

Comme il a été mentionné au chapitre 2 (voir tableau 2.3), en 1998, le gouvernement brésilien a établi un échéancier pour mettre fin au brûlage de la canne à sucre. Selon cette nouvelle législation, le brûlage de la canne à sucre sera interdit dans les zones où la mécanisation de la récolte est possible (terrain avec inclinaison inférieure à 12 %). Par contre, la loi n'interdit pas le brûlage sur les terrains où la mécanisation n'est pas possible. Seul l'État de São Paulo et plus récemment l'État du Minas Gerais ont entrepris des démarches pour éliminer totalement et définitivement cette pratique sur leur territoire. À long terme, ces mesures permettront d'améliorer la qualité de l'air dans les régions sucrières de ces états. Néanmoins, il est possible que les problèmes de santé publique liés au brûlage de la canne à sucre persistent dans les régions du Brésil où la mécanisation de la récolte est impossible. Cette situation risque de se produire dans le Nord-Est où les cannaies sont situées en majorité sur des terrains trop

escarpés pour la machinerie. Dans cette région, plus de la moitié des plantations ne pourront être récoltées mécaniquement (Rodrigues et Ortiz, 2006).

En résumé, le brûlage de la canne à sucre est responsable de l'aggravation de l'état de santé de nombreuses personnes (Uriarte *et al.*, 2009; Cançado *et al.*, 2006; Arbex *et al.*, 2007). Naturellement, l'augmentation des visites journalières dans les hôpitaux peut engendrer des coûts supplémentaires pour le système de santé publique brésilien. Selon Uriarte *et al.* (2009), les effets néfastes des incendies sur la santé ne sont pas un fardeau seulement pour le système de santé publique, mais aussi sur l'économie des ménages. Malheureusement, aucune étude économique n'a été menée pour calculer les coûts sociaux sous-jacents au brûlage de la canne à sucre. De telles études seraient souhaitables afin de déterminer les coûts réels pour le système de santé qu'implique cette pratique encore largement utilisée au Brésil. Malgré la mise en place de la réglementation, il est estimé que près de 80 % des cultures de canne à sucre sont encore incendiées dans l'État de São Paulo (UNICA, 2008 cité dans Uriarte *et al.*, 2009).

3.3 La sécurité alimentaire

Selon une définition communément acceptée, il y a insécurité alimentaire lorsque les êtres humains ne disposent pas d'un accès physique ou économique à une quantité d'aliments sains et nutritifs suffisante leur permettant de satisfaire leurs besoins énergétiques et leurs préférences alimentaires pour mener une vie saine et active (FAO, 2009b). Pour la période 2003 à 2005, la FAO estimait à 848 millions le nombre de personnes dans le monde qui n'avaient pas accès à une alimentation saine et suffisante (FAO, 2008b). Plus récemment, les effets combinés de la hausse des prix des denrées alimentaires et de la crise économique ont aggravé la condition alimentaire de nombreuses personnes sur Terre. Ainsi, la FAO confirmait en 2009 que plus d'un milliard de personnes souffraient de la faim (FAO, 2009b).

Au niveau mondial, les ressources en terre et en eau propices pour la production d'aliments sont limitées. Dans de nombreux pays, la surface agricole utile a tendance à diminuer à cause de l'expansion des zones urbaines et industrielles et de la dégradation des sols. De plus, sachant que la population mondiale est en pleine croissance, la production alimentaire mondiale devra augmenter de 50 % pour nourrir la population mondiale d'ici 2050 (TEEB, 2008). D'un autre côté, afin de satisfaire les besoins des pays en « énergie verte », un nombre grandissant de terres agricoles sont utilisées pour la production de biocarburants. Selon l'Agence internationale de l'énergie (cité dans FAO, 2008a), la part des sols consacrés à la culture de biomasses pour la production de biocarburants liquides pourrait tripler au cours des 20 prochaines années. L'utilisation grandissante de terres agricoles pour la production de carburant soulève de nombreuses questions d'ordre éthique et fait l'objet d'un vif débat sur la scène internationale, un débat nommé « nourriture contre carburant » (Cotula *et al.*, 2008).

Au Brésil, les superficies agricoles consacrées à la canne à sucre sont en pleine expansion. Selon Smeets *et al.* (2008), l'augmentation de la production de canne à sucre pour la production d'éthanol peut entrer en concurrence directe avec la production d'aliments, ce qui peut menacer la sécurité alimentaire. Durant les décennies 70 et 80, l'expansion de la filière de l'éthanol a causé des changements marquants dans l'utilisation des terres agricoles. Par exemple, dans l'État de São Paulo de 1974 à 1979, l'augmentation des superficies consacrées aux cannaies s'est exercée principalement aux dépens de cultures vivrières (Goldemberg *et al.*, 2008). À titre indicatif, durant les cinq premières années du *Proalcool*, 376 000 ha de terres agricoles dans l'État de São Paulo (36 % de cultures vivrières et 64 % de pâturages) ont été convertis en monocultures de canne à sucre (Smeets *et al.*, 2006). L'impact le plus important s'est fait ressentir sur les cultures de maïs et de riz dont les superficies ont diminué de 35 % (Saint, 1982 cité dans ESMAP, 2005). Plus récemment, durant la saison des récoltes 2005-2006, l'augmentation des superficies de plantations de canne à sucre dans le Sud-Est brésilien a occasionné une réduction notable de la production de tomates, d'arachides et d'oranges pour l'État de São Paulo (IEA, 2006 cité dans Smeets *et al.*, 2008). Des réductions dans la

production de café dans les États de São Paulo, d’Espírito Santo et du Mina Gerais ont aussi été notées (CONAB, 2006 cité dans Smeets *et al.*, 2008).

D’ici 2020, le secteur du sucre et de l’alcool prévoit doubler les superficies agricoles consacrées à la canne à sucre pour atteindre près de 14 millions d’hectares (Amaral *et al.*, 2008). Il est prévu que cette expansion s’effectue au détriment de terres et de pâturages dégradés (Goldemberg *et al.*, 2008). Cette mesure devrait permettre de limiter en partie la concurrence directe avec la production d’aliments (Leite *et al.*, 2009). Toutefois, il demeure que la culture de canne à sucre pour produire de l’éthanol augmente la concurrence entre les différents secteurs agricoles pour l’occupation de la terre. Au Brésil, la disponibilité des terres agricoles productives demeure un facteur limitant puisque les terres agricoles ne sont pas autorisées à augmenter pour éviter les effets néfastes sur la biodiversité (Smeets *et al.*, 2008). Ainsi, les différents secteurs agricoles (élevages, cultures vivrières et cultures énergétiques) dépendent de ressources terriennes limitées. Dans cette optique, au Brésil, la culture de canne à sucre pour la production d’éthanol peut concurrencer directement la production alimentaire en utilisant les mêmes ressources.

3.4 Les biocarburants et les prix des denrées alimentaires

En 2008, les prix des denrées alimentaires sur le marché international ont atteint des sommets inégalés depuis les années 70. La FAO (2009a) estime que la flambée des prix alimentaires a plongé près de 115 millions de personnes supplémentaires dans une situation de famine chronique en 2007 et 2008. En 2009, les effets combinés de la crise financière et de la récession mondiale ont fait reculer le prix des aliments à leur niveau de 2007. Toutefois, les prix dépassent les niveaux observés encore récemment et tout porte à croire qu’ils resteront élevés par rapport aux tendances historiques (FAO, 2009a).

En 2007, le Rapporteur spécial des Nations Unies sur le droit à l'alimentation, Jean Ziegler soulevait dans son rapport les principales incertitudes liées à la demande grandissante de biocarburants à l'échelle planétaire (voir Ziegler, 2007). À l'époque, Monsieur Jean Ziegler demandait à la communauté internationale d'imposer un moratoire sur la production de biocarburants. Les pays ont décidé de ne pas imposer le moratoire recommandé par le Rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation. Ce dernier s'inquiétait notamment d'une éventuelle montée des prix des aliments causée par une demande grandissante de ressources agricoles pour la production de biocarburant. Des analyses récentes de la FAO (2009a), confirmaient que cette nouvelle source de demande joue un rôle significatif dans la fluctuation des prix des aliments au niveau mondial. Vers la mi-2008, le prix réel des aliments était en moyenne 64 % plus élevé qu'en 2002; cette augmentation est due à une combinaison de facteurs, dont fait partie la demande grandissante en biocarburant (FAO, 2009a, FAO, 2009b). En fait, la demande de certains produits agricoles utilisés pour la production de carburants peut entraîner une réduction des ressources productives allouées à la production d'aliments. Selon la FAO (2009a), la production de biocarburants peut réduire la disponibilité de produits alimentaires sur le marché parce que la demande de grains, de sucre ou d'huiles, pour produire des carburants pourrait supplanter celle destinée à la production alimentaire, lorsque les prix du pétrole et des produits de base favorisent la production de biocarburants (résumé dans FAO, 2009a).

L'augmentation du prix des denrées alimentaires a un effet négatif direct sur l'accès à la nourriture des pauvres et des plus vulnérables (Cotula *et al.*, 2008). L'alimentation représente l'essentiel du budget des ménages pauvres et les prix des denrées affectent directement leur sécurité alimentaire (FAO, 2008a). Pour la période de 2004 à 2006, la FAO (2009b) affirmait que 6 % de la population brésilienne, soit 11,9 millions de personnes étaient victimes de la faim. L'insécurité alimentaire au Brésil est principalement due à la pauvreté qui règne dans le pays (Smeets *et al.*, 2008). Ainsi, la malnutrition au Brésil serait causée par la pauvreté qui empêche une partie de la population d'avoir accès à une alimentation suffisante et de qualité.

Très souvent, les agrocarburants sont cités comme étant une solution aux problèmes de pauvreté et d'insécurité alimentaire des milieux ruraux pauvres (Cotula *et al.*, 2008). Il est souvent question des nombreux emplois et des retombées économiques que crée l'industrie de l'éthanol et du sucre. Cependant, comme il a été mentionné précédemment, ces emplois sont souvent très peu rémunérés et ne permettent pas aux familles de sortir de la pauvreté. Il semblerait par ailleurs que les salaires offerts ne soient pas suffisants pour assurer une sécurité alimentaire pour les travailleurs et leurs familles. Plusieurs études ont relaté des situations d'insécurité alimentaire parmi les travailleurs saisonniers ruraux dont font partie les coupeurs de canne (Leite *et al.*, 2004; Silva, 1999 cités dans Carneiro *et al.*, 2008). La plupart des familles de ces travailleurs consacrent plus de la moitié de leur revenu familial à leur alimentation (Carneiro *et al.*, 2008). De plus, il est à noter qu'avec l'augmentation de la mécanisation de la récolte, un grand nombre de travailleurs ruraux se retrouveront sans travail. En prenant en compte cette nouvelle réalité, il se peut qu'à court et moyen terme la condition alimentaire de nombreuses familles de travailleurs ruraux se détériore. Davantage d'études seront nécessaires afin d'évaluer les impacts qu'ont les pertes d'emploi sur la sécurité alimentaire des familles de travailleurs.

3.5 L'accès à la terre pour une meilleure sécurité alimentaire

Au Brésil, il existe une répartition très inégale du territoire agricole qui est à l'origine de nombreux conflits en milieu rural. En fait, une faible proportion de la population possède la majorité des terres agricoles du pays, un phénomène nommé la concentration foncière. Par ailleurs, une grande partie de la population rurale pauvre n'a pas accès à la terre (les paysans sans terre). Ce problème a pris racine au temps de la colonisation du pays, à l'époque où les Portugais s'attribuaient de vastes territoires afin d'en assurer le contrôle et l'exploitation (résumé dans De Medeiros, 2007). Depuis l'indépendance du Brésil, différents gouvernements ont tenté à maintes reprises de redistribuer la terre aux populations rurales par le biais de

réformes agraires (révisé dans De Medeiros, 2007). Cependant, le problème subsiste toujours alors que 3,5 % des propriétaires terriens du Brésil possèdent plus de la moitié des terres arables du pays (MDA, 2003 cité dans Wittman, 2009).

En milieu défavorisé, l'accès à la terre permet aux pauvres d'assurer leur sécurité alimentaire et d'améliorer leur qualité de vie (résumé dans Cotula *et al.*, 2008). Une étude de Leite *et al.* (2004 cité dans Carneiro *et al.*, 2008) menée dans la campagne brésilienne démontre que l'accès à la terre tend à améliorer la sécurité alimentaire des familles rurales pauvres. En fait, l'accès à la terre permet aux familles pauvres de pratiquer une agriculture de subsistance. De plus, certains ménages peuvent même bénéficier des revenus provenant de la vente d'une partie de leur production agricole. D'autre part, les biocarburants peuvent être considérés comme un nouveau marché sur lequel les petits cultivateurs peuvent obtenir des revenus provenant de la vente de produits agricoles.

En principe, les cultures énergétiques pourraient représenter de nouvelles opportunités d'affaire pour les paysans pauvres du Brésil, puisqu'ils pourraient accéder au marché du bioéthanol en vendant de la canne à sucre directement aux industries. Ainsi, les petits cultivateurs pourraient bénéficier de revenus supplémentaires obtenus par la vente de matière première aux industries. Toutefois, la production d'éthanol au Brésil est basée sur un modèle agro-industriel qui intègre très peu de petits producteurs. Depuis l'instauration du *Proalcool* dans les années 70, la rentabilité de la filière de l'éthanol s'est développée sur un modèle de productions de masse qui ne profite pas aux petits agriculteurs. Encore aujourd'hui, un très grand nombre de familles pauvres en milieu rural n'a toujours pas accès à la terre. De plus, l'expansion des plantations de canne à sucre sur de nouveaux territoires contribuerait à réduire l'accès à la terre pour les familles en milieu rural. Cette exclusion serait occasionnée principalement par une augmentation de la concentration foncière et par la hausse du prix de la terre.

Dans les années 1970 et 1980, la rapide expansion des monocultures de canne à sucre aurait été responsable de l'aggravation de la concentration foncière au Brésil (Peskest *et al.*, 2007). Selon Rothkopf (2007), 70 % des superficies de cultures de canne à sucre du Brésil sont la propriété d'environ 340 industries qui possèdent en moyenne 30 000 ha de cultures. Les 30 % restant appartiennent à 60 000 petits propriétaires terriens possédant en moyenne 27,5 ha de plantations. Durant les premières années du *Proalcool*, les généreuses subventions octroyées ont rendu la culture de la canne à sucre très attrayante et très lucrative pour les grands propriétaires terriens, ce qui a exacerbé les rivalités pour l'accès à la terre (Smeets *et al.*, 2006). Les incitatifs financiers pour la production vivrière n'étaient pas compétitifs avec ceux du *Proalcool*, ce qui a incité de nombreux petits cultivateurs à quitter ou à vendre leur terre (Smeets *et al.*, 2006). Selon certains rapports, de nombreux petits propriétaires terriens ont été forcés de quitter leur terre sous des pressions légales, économiques ou parfois même sous les menaces et l'intimidation physique (Saint, 1982 cité dans ESMAP, 2005). Sans aucun doute, ces faits historiques démontrent que la législation brésilienne en matière de droit foncier semble insuffisante pour protéger les petits propriétaires terriens (Smeets *et al.*, 2008).

De plus, l'expansion des cultures dédiées à la production de biocarburant a tendance à faire augmenter la valeur de la terre (Cotula *et al.*, 2008). Au Brésil, une hausse considérable du prix de la terre a été observée dans certaines régions. En fait, la demande croissante de terres agricoles pour la production d'éthanol a poussé les producteurs de canne à étendre leurs cultures au sein de nouvelles régions. Par exemple, les cultures de canne s'étendent de plus en plus dans l'ouest de l'État de São Paulo. Toutefois, une grande quantité des terres de cette région sont déjà occupées par d'autres cultures ne laissant que très peu de terres disponibles. Ainsi, l'augmentation de la concurrence pour l'utilisation des terres dans cette région a occasionné des hausses considérables du prix de la terre. Entre 2002 et 2005, la valeur moyenne des terres agricoles a plus que doublé dans l'ouest de l'État de São Paulo passant de 1 350 USD par hectare à 3 070 USD par hectare (Martines-Filho *et al.*, 2006). Cette

augmentation des prix a pour effet de réduire l'accès à la terre pour les pauvres, rendant l'achat impossible pour des familles possédant déjà un très faible pouvoir d'achat.

Enfin, diverses mesures devraient être adoptées afin de minimiser les impacts négatifs qu'exerce l'industrie de l'éthanol sur l'accès à la terre et sur l'exclusion des petits producteurs. Tout d'abord, un resserrement de la législation brésilienne en matière de droit foncier afin d'assurer une protection adéquate des petits propriétaires terriens (Smeets *et al.*, 2006). Ensuite, selon Carneiro *et al.*, (2008) la redistribution des terres agricoles par un vaste programme de réforme agraire permettrait d'améliorer la condition alimentaire et la qualité de vie des familles pauvres vivant en milieu rural. Par ailleurs, l'intégration des petits cultivateurs au marché du bioéthanol pourrait représenter un outil permettant de réduire la pauvreté en milieu rural. À titre d'exemple, l'intégration des petits producteurs pourrait prendre la forme d'allègements fiscaux accordés aux industries d'éthanol s'approvisionnant en partie ou en totalité chez de petits producteurs de canne à sucre. Ce type de mesures est déjà utilisé dans le cadre du *Probiodiesel*, un programme lancé dernièrement par le gouvernement brésilien pour promouvoir la production de biodiésel.

Chapitre 4

Analyse du coût environnemental, écologique et social de l'éthanol brésilien

Le Brésil cumule une expérience et une expertise significative sur la production et l'utilisation à grande échelle de biocarburant liquide pour le domaine des transports. Au fil du temps, la filière de l'éthanol est devenue économiquement viable et permet au Brésil de jouir d'une sécurité énergétique accrue. De ce fait, de nombreux pays désirent imiter le modèle brésilien en produisant à grande échelle l'éthanol de canne à sucre. Pour la plupart, il s'agit de pays en développement des Caraïbes, d'Afrique, d'Amérique du Sud, d'Asie de l'Est où la canne à sucre est traditionnellement cultivée (Dufey, 2008). Toutefois, la revue de littérature présentée dans le présent essai soulève un bon nombre de problèmes écologiques, environnementaux et sociaux liés à la production de l'éthanol au Brésil. L'expérience brésilienne permet entre autres d'identifier certains enjeux qui soulèvent de sérieux doutes sur la viabilité à long terme et le bienfondé de l'éthanol de canne à sucre et des autres biocarburants liquides issus de matières premières agricoles.

4.1 L'éthanol brésilien : vers une production certifiée

Le Brésil possède actuellement une législation environnementale et sociale importante qui encadre la culture de la canne à sucre et la production de l'éthanol (Smeets *et al.*, 2008; Smeets *et al.*, 2006; De Almeida *et al.*, 2007). Toutefois, l'information retrouvée dans la littérature révèle qu'un bon nombre de pratiques de l'industrie ne sont pas conformes aux lois en vigueur. L'application des lois au Brésil est généralement faible et par conséquent un bon nombre d'usines ne sont pas en conformité avec la législation existante (Smeets *et al.*, 2008; Fischer *et al.*, 2008). Selon Martinelli et Filoso (2008), l'industrie de la canne à sucre bénéficie de l'appui et de la protection des politiciens et des lobbyistes depuis des centaines

d'années, ce qui par conséquent a créé un héritage de mépris envers les lois environnementales et sociales du pays.

Récemment, de nombreuses études ont été menées afin d'évaluer la performance environnementale et sociale de la production de l'éthanol au Brésil. Ces initiatives sont, en majorité, motivées par l'intérêt grandissant que prend ce biocarburant sur les marchés internationaux. Il s'agit très souvent de rapports réalisés en collaboration avec des pays intéressés à importer l'éthanol produit au Brésil (voir Smeets *et al.*, 2006; Rodrigues et Ortiz, 2006; Smeets *et al.*, 2005). Les gouvernements de ces pays cherchent à savoir si le biocarburant répond à des critères de production durable. L'atteinte de certains standards environnementaux et sociaux de production peut passer par la mise en place d'une certification environnementale. De plus, l'octroi d'un label écologique pour l'éthanol brésilien permettrait de remédier aux situations de non conformité puisque le respect des lois est habituellement un critère pour l'obtention et le maintien d'une certification environnementale (Smeets *et al.*, 2008). En cas de manquement à l'égard de la loi, certaines industries risqueraient de perdre leur certification et elles pourraient se voir refuser l'importation de leur carburant dans certains pays. Afin de répondre aux exigences des marchés internationaux, les producteurs d'éthanol brésiliens n'auront d'autre choix que d'adopter de meilleures pratiques culturelles et industrielles et ils devront envisager de mettre sur pied une production d'éthanol encadrée par une certification.

4.2 Le coût environnemental, écologique et social de l'éthanol

L'éthanol de canne à sucre produit au Brésil est actuellement le biocarburant ayant le coût de production le moins élevé au monde (FAO, 2008a). Les raisons historiques du succès économique de la filière brésilienne de l'éthanol ont été exposées au chapitre 1. Par contre, il a été démontré aux chapitres 2 et 3 que la production d'éthanol est associée à de nombreux problèmes qui soulèvent certaines incertitudes. En fait, la viabilité économique de l'éthanol de

canne à sucre semble dépendre en partie de pratiques et de méthodes insoutenables pour l'environnement, les écosystèmes et la société. Au fil du temps, l'industrie de l'éthanol semble s'être bâtie en créant un déficit environnemental, écologique et social. Ce déficit pourrait être aussi qualifié de coût environnemental, écologique et social de l'éthanol. Logiquement si ce coût excède les bénéfices obtenus par l'éthanol, il peut devenir difficile de justifier l'utilisation et la production du biocarburant. Afin de répondre aux changements climatiques, les investissements doivent être dirigés vers les biocarburants qui offrent les meilleurs bilans d'émission de GES, assortis des coûts sociaux et environnementaux les plus bas (FAO, 2008a). Selon les méthodes de calculs actuellement utilisées, l'éthanol de canne à sucre posséderait un des meilleurs bilans d'émissions de GES (voir Macedo, 2008), cependant l'ensemble de ses coûts sociaux et environnementaux n'a toujours pas été comptabilisé (Uriarte *et al.*, 2009).

L'élaboration d'une évaluation exhaustive du coût environnemental, écologique et social de l'éthanol brésilien n'est pas chose facile, et ce malgré la disponibilité des données et des études portant sur le sujet. Par contre, il est possible d'estimer partiellement ce coût en évaluant les coûts de production supplémentaires qu'entraînerait l'adoption de pratiques socialement acceptables et durables au point de vue environnemental. Une étude de Smeets *et al.* (2008) a évalué les augmentations de coûts liées à la mise en place d'une production d'éthanol durable dans le cadre d'une certification environnementale. Les chercheurs ont établi une liste de critères socio-environnementaux qui pourraient être utilisés pour la mise en place d'un label. Cette étude a été menée sur la production d'éthanol de l'État de São Paulo, la principale région productrice du Brésil. Selon Smeets *et al.* (2008), une augmentation du coût de production de l'ordre de 37 % serait à prévoir pour l'adoption de mesures et pratiques durables par l'industrie. Toutefois, il n'existe pas de consensus sur la définition de la durabilité et l'adoption de critères plus stricts pourrait occasionner une augmentation supplémentaire des coûts de production (Smeets *et al.*, 2008). À titre d'exemple, Smeets *et al.* (2008) proposent une augmentation arbitraire du salaire des coupeurs de canne à sucre de 50 % ce qui

correspond à une augmentation de 4 % du coût de production de l'éthanol. Néanmoins, une augmentation des salaires au niveau du salaire minimum nécessaire du DIEESE (augmentation de plus de 400 %) pourrait être socialement plus acceptable (voir chapitre 3, section 3.1.3). Une telle augmentation correspondrait à une hausse de 36 % du coût de production. La figure 4.1 résume les diverses mesures qui pourraient être mises en place afin d'améliorer la performance environnementale et sociale de l'éthanol et le graphique illustre l'augmentation du coût de production s'y afférant.

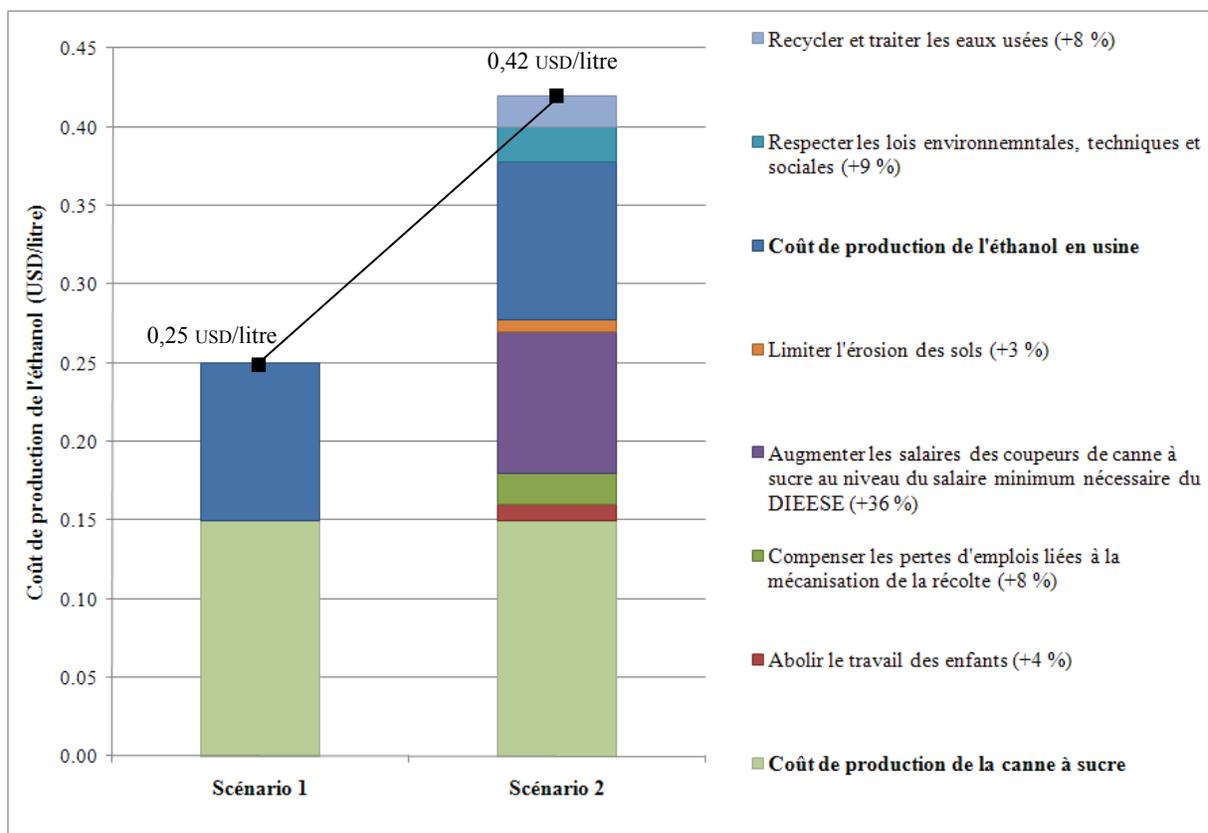


Figure 4.1 Le coût de production de l'éthanol : scénario de production actuel (scénario 1) et scénario impliquant des mesures sociales et environnementales plus acceptables (scénario 2)

Inspiré de : Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A., Dolzan, P. et Turkenburga, W. (2008). p. 800

La viabilité économique de la filière de l'éthanol est dépendante de l'économie puisque le coût de production du biocarburant doit être compétitif par rapport aux combustibles fossiles (Nass *et al.*, 2007). Les prix élevés du pétrole des dernières années ont largement favorisé la viabilité économique des biocarburants. En 2010, le prix moyen du baril de pétrole était d'environ 77 dollars américains (OPEC, 2011). Au Brésil, l'éthanol de canne à sucre est produit à un prix équivalent de 30 à 35 dollars américains le baril de pétrole (Hazell, 2006). En général, il est estimé que l'éthanol peut concurrencer la gazoline lorsque le prix du baril de pétrole est supérieur à 38 dollars américains (van den Wall Bake *et al.*, 2009).

La hausse du coût de production associée à l'adoption de certains critères de production durable a été estimée à 68 % (voir figure 4.1). Le coût de production de l'éthanol passerait donc de 25 cents américains le litre à environ 42 cents américains le litre. Une hausse de cet ordre pourrait affecter à court terme la viabilité économique de l'éthanol brésilien dans un contexte où le prix du pétrole se situe sous la barre des 60 dollars américains le baril. Au fil du temps, l'expérience acquise ainsi que les progrès technologiques pourraient cependant réduire les coûts supplémentaires associés aux nouveaux standards de production (Smeets *et al.*, 2008), sans compter que le maintien du prix du pétrole à son niveau actuel contribuerait certainement au maintien de la rentabilité de la filière. En outre, le calcul ici présenté ne considère pas les bénéfices économiques et énergétiques que procure le carburant. Il n'inclut pas les revenus de la vente des surplus d'électricité produits grâce à l'utilisation de la bagasse. De plus, des revenus supplémentaires pourraient éventuellement provenir des crédits de carbone octroyé pour la réduction d'émission de GES (Smeets *et al.*, 2008; Walter *et al.*, 2008).

Malgré tout, l'exercice proposé à la figure 4.1 permet tout de même d'évaluer partiellement le coût environnemental, écologique et social de l'éthanol à environ 17 cents américains le litre. En d'autres termes, puisque l'éthanol n'est actuellement pas produit de façon durable et que le biocarburant est produit en dépit des normes et lois en vigueur, chaque litre d'éthanol produit

au Brésil crée minimalement un déficit environnemental, écologique et social de 17 cents. Il est important de souligner que le calcul économique ici présenté inclut seulement les coûts associés à certains impacts directs de la production d'éthanol (voir Smeets *et al.*, 2008).

En fait, le calcul proposé à la figure 4.1 n'inclut pas les coûts liés aux impacts indirects de la production d'éthanol. La plupart de ces impacts sont considérables et l'intégration de leurs coûts au calcul pourrait remettre en doute la viabilité économique de la filière de l'éthanol. La revue de littérature qui a été présentée précédemment a permis de déterminer les principaux impacts indirects associés à la production d'éthanol au Brésil. Ces derniers sont les problèmes de santé publique causés par le brûlage des cultures, la réduction de l'accès à la terre pour les pauvres, l'augmentation du prix des denrées alimentaires, les changements indirects dans l'affectation des terres ainsi que la perte de biodiversité qui occasionne la dégradation des services écosystémiques. La prise en compte des impacts indirects est primordiale puisque les coûts sociaux nécessaires pour surmonter ces problèmes peuvent être très élevés. Néanmoins, l'étendue et l'ampleur des implications économiques des impacts indirects sont généralement difficiles à évaluer. Ainsi, il peut être difficile d'établir une réglementation ou des normes de certification adéquates pour encadrer les effets indirects. Selon la FAO (2008a), les approches réglementaires des normes et des certifications ne constituent pas forcément la première et la meilleure façon d'obtenir une participation large et équitable à la production de biocarburant. De nouvelles études économiques sont donc nécessaires afin d'être en mesure de comptabiliser l'ensemble des coûts associés aux impacts directs et indirects de la production d'éthanol au Brésil.

À ce jour, la plupart des efforts visant à évaluer les différents biocarburants ont porté sur leur capacité à réduire les émissions de GES et à réduire l'utilisation des combustibles fossiles (Sharlemann et Laurence, 2008). L'analyse du cycle de vie est actuellement le principal outil utilisé pour calculer les bilans d'émission de GES et la balance énergétique des biocarburants. Généralement, les impacts des biocarburants comme ceux sur l'eau ou la biodiversité ne sont

pas pris en compte dans les analyses de cycle de vie existantes (PNUE, 2009a). Afin de procurer une idée plus juste de leurs avantages et inconvénients, les études du cycle de vie devraient inclure plus de critères environnementaux, voir mêmes sociaux. Une étude de Zah *et al.* (2008) a démontré que même si la plupart des biocarburants ont la capacité de réduire les émissions de GES, la majorité de leur filière de production présente, pour plusieurs autres indicateurs environnementaux, une charge environnementale plus élevée que l'essence. Enfin, du point de vue environnemental, les analyses de cycle de vie devraient prendre en compte minimalement les émissions de GES provenant des changements directs et indirects d'affectation des terres et les questions liées à l'eau et la biodiversité (PNUE, 2009a).

4.3 Les biocarburants, opportunités, risques et enjeux globaux

Bien que les biocarburants soient associés à certains risques, ils peuvent représenter aussi certaines opportunités. Effectivement, si les agrocarburants sont produits de façon durable et équitable, ils peuvent fournir des bénéfices économiques et énergétiques importants. Pour les pays en développement, plus particulièrement au Brésil, les principaux avantages reposent sur la création d'emplois et de revenus, les possibilités d'investissements étrangers, le développement régional dans les zones défavorisées, la vente de technologies et la coopération technique avec d'autres pays (résumé dans Sawyer, 2008). Sans contredit, la production et la consommation d'éthanol au Brésil a contribué à accroître la sécurité énergétique en réduisant les importantes dépenses liées aux importations de pétrole et de gazoline (De Almeida *et al.*, 2007). Néanmoins, lorsque la production de biocarburants est remise dans une perspective globale, il est possible d'identifier des enjeux qui pourraient à long terme véritablement compromettre leur viabilité. Les principaux enjeux globaux identifiés sont la sécurité alimentaire et la biodiversité. Selon Smeets *et al.* (2008) ces enjeux pourraient représenter des goulots d'étranglement majeurs pour la mise en place d'une production d'éthanol certifiée au Brésil.

4.3.1 L'enjeu de la sécurité alimentaire

Ce qui rend les biocarburants particulièrement attrayants est le fait qu'ils soient produits à partir de matières premières agricoles, une ressource considérée renouvelable. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que les biocarburants actuels dépendent de ressources terriennes limitées et concurrencent ainsi d'autres utilisations du sol comme la production de denrées alimentaires et la conservation des écosystèmes naturels.

Au cours de la prochaine décennie, la population mondiale augmentera de 11 %, passant de 6,9 à 7,7 milliards de personnes (ONU, 2011). Historiquement, les rendements agricoles augmentaient plus rapidement que la population mondiale ce qui permettait de produire davantage de nourriture sur les terres agricoles existantes (PNUE, 2009a). Toutefois, l'augmentation de la production agricole mondiale devrait être moins rapide au cours de la décennie à venir (OCDE et FAO, 2010). De plus, les régimes alimentaires des populations sont de plus en plus orientés vers une alimentation riche en protéines animales, ce qui augmente considérablement les besoins en terres cultivées à l'échelle globale (PNUE, 2009a). Selon le rapport Gallagher (RFA, 2008), la superficie des terres agricoles devrait augmenter de l'ordre de 144 à 334 millions d'hectares d'ici 2020 afin de répondre aux besoins mondiaux en alimentation. La figure 4.2 illustre l'évolution de la demande alimentaire globale ainsi que la diminution des surfaces agricoles disponibles par personne de 1960 à 2005.

La production de biocarburants liquides nécessite de très grandes superficies de terres afin de procurer une contribution significative à l'atténuation des émissions de GES des combustibles fossiles (Righelato et Spracklen, 2007). En 2008, l'utilisation globale des terres pour la production de biocarburants liquides était de 36 millions d'hectares ce qui correspondait à environ 2,3 % des terres agricoles de la planète (PNUE, 2009a). Les estimations des besoins futurs en terres pour la production de biocarburants sont très variables en fonction des hypothèses de base. Il est estimé qu'entre 118 et 508 millions d'hectares seraient nécessaires pour fournir seulement 10 % de la demande mondiale en combustible fossile en 2030, ce qui

correspond à une fourchette comprise entre 8 et 36 % des terres agricoles actuelles (PNUE, 2009a).

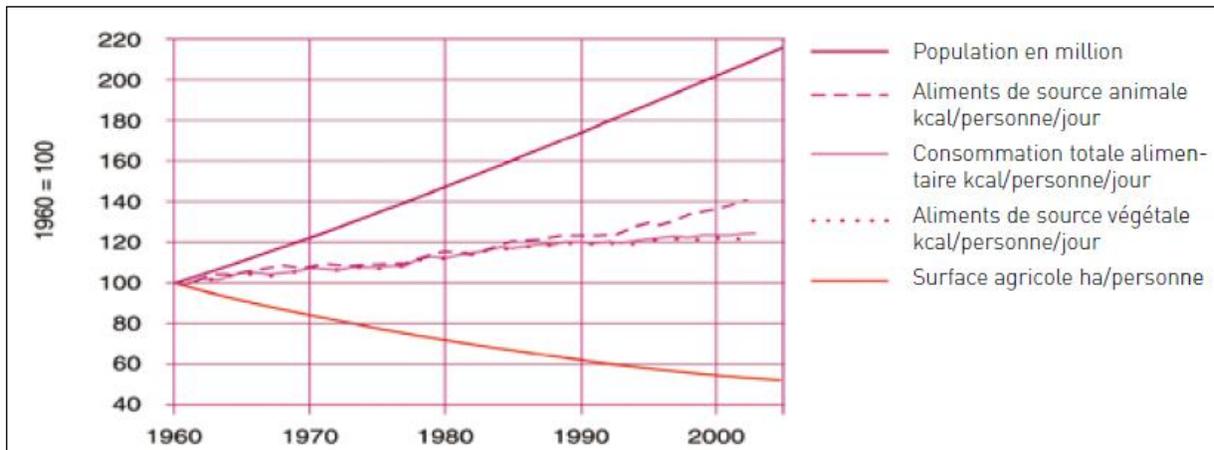


Figure 4.2 Évolution de la population mondiale, des terres agricoles et de la consommation par personne (1960-2005)

Source : PNUE, (2009b). p.13

Afin de répondre aux besoins grandissants en alimentation et en énergie, les superficies cultivées devront nécessairement s'accroître à l'échelle globale. D'ici 2020, l'évolution des régimes alimentaires et de la demande en biocarburant pourrait engendrer une augmentation globale des terres agricoles de 200 à 500 millions d'hectares, et ce, en tenant compte de l'accroissement des rendements agricoles prévu (RFA, 2008). En fait, les biocarburants font face à deux contraintes majeures qui pourraient limiter à long terme leur viabilité. D'une part, ils concurrencent la production alimentaire pour des ressources agricoles limitées et d'autre part, les terres arables ne pourront s'accroître au détriment des écosystèmes sans que les biens et services écosystémiques soient compromis.

Selon la FAO (2008a), les superficies des terres potentiellement disponibles pour l'augmentation de la production de cultures se situent pour la majeure partie dans les zones

tropicales d’Afrique et d’Amérique latine. Les trois quarts de la population mondiale recensée comme pauvre vivent principalement dans ces régions et dépendent habituellement de l’agriculture pour leur subsistance. Ainsi, les biocarburants pourraient présenter une opportunité pour les pays du sud en faisant de l’agriculture un moteur de développement en milieu rural (FAO, 2008a). Toutefois, les biocarburants peuvent aussi être associés à des risques tangibles pour la sécurité alimentaire et l’accès à la terre pour les pauvres. Malgré son succès économique et énergétique, la filière brésilienne de l’éthanol est loin de prouver hors de tout doute que les biocarburants peuvent jouer un rôle clé dans le développement des régions rurales défavorisées sans toutefois représenter des risques. Au contraire, l’expérience brésilienne nous révèle plutôt qu’une production rentable de biocarburant peut être associée à des coûts environnementaux, écologiques et sociaux très élevés.

4.3.2 L’enjeu de la biodiversité : les biens et services écosystémiques

Comme le rapporte l’EM, la perte de biodiversité à l’échelle globale est un enjeu majeur et le déclin des biens et services écosystémiques qui en résulte ne sera pas sans conséquence pour le bien-être des populations humaines (voir MEA, 2005). L’expansion des terres agricoles représente une des principales menaces qui pèsent sur la diversité biologique à l’échelle mondiale (SCDB, 2010). Ainsi, les terres agricoles ne pourront s’accroître sans provoquer un appauvrissement de la biodiversité et une dégradation des biens et services écosystémiques. De plus, si les écosystèmes terrestres sont amenés à dépasser certains seuils ou points de basculement, les risques liés à la perte de biodiversité et à la dégradation de certains services écosystémiques pourraient être considérables (TEEB, 2008; SCDB, 2010). La perte de ces services affectera d’abord et de manière plus sévère les populations les moins bien nanties dans la mesure où elles dépendent souvent plus directement des écosystèmes qui les entourent (SCDB, 2010).

Le troisième rapport sur les Perspectives mondiales de la diversité biologique (SCDB, 2010) fournit un exemple des éventuelles conséquences associées à l'atteinte d'un point de non-retour pour l'écosystème de la forêt amazonienne. Les suivis satellitaires du couvert forestier de l'Amazonie relèvent qu'en plus du déboisement, une grande partie de la forêt se dégrade. Entre 2007 et 2009, près de 57 000 kilomètres carrés de forêt se seraient détériorés (INPE, 2011a). Sous les interactions de la déforestation, des feux de forêt et des changements climatiques, la forêt amazonienne pourrait subir un dépérissement généralisé de vastes portions de son territoire (SCDB, 2010). Une détérioration de la plus vaste forêt tropicale du monde pourrait avoir des conséquences à l'échelle mondiale, par le biais d'une augmentation des émissions de GES, contribuant à une accélération des changements climatiques. Un tel phénomène entraînerait aussi une baisse des précipitations au niveau régional, compromettant à terme la viabilité du secteur agricole (SCDB, 2010). Bien qu'il subsiste de nombreuses incertitudes autour de ces scénarios, on sait qu'un dépérissement généralisé de la forêt amazonienne sera beaucoup plus probable si les superficies déboisées dépassent les 20 %, alors que la forêt amazonienne a déjà perdu 17 % de son couvert forestier initial (SCDB, 2010).

La régulation des précipitations à l'échelle régionale par les écosystèmes est un service écosystémique de premier ordre pour la viabilité du secteur agricole. Ainsi, une dégradation de ce service pourrait avoir des conséquences sur le rendement et la rentabilité des cultures vivrières pour la production d'aliments et d'énergie. En ce sens, il semble logique d'envisager la conservation et la restauration des écosystèmes ainsi que le maintien des services écosystémiques comme option valable dans la lutte contre les changements climatiques et la perte de biodiversité à l'échelle globale.

4.4 L'importance économique des biens et services écosystémiques

À la lumière de l'analyse qui a été effectuée précédemment, production et l'utilisation à grande échelle de biocarburants d'origine agricole comme moyen de lutte contre les changements climatiques ne semblent pas viables à long terme. Dans le modèle économique à succès du Brésil, les coûts environnementaux, écologiques et sociaux sont élevés et les incertitudes liées à la biodiversité et à la sécurité alimentaire sont considérables. De nombreux environnementalistes et des gouvernements font valoir que la lutte aux changements climatiques ne devrait pas se limiter au simple remplacement des combustibles fossiles par les biocarburants (Sawyer, 2008). Une partie de la solution pourrait venir à court terme par une utilisation efficiente des combustibles fossiles et la conservation et la restauration des écosystèmes alors qu'à long terme le développement de nouvelles technologies sera indispensable pour remplacer les combustibles fossiles utilisés dans le transport (Righelato et Spracklen, 2007).

Une étude de Righelato et Spracklen (2007) a démontré que la conservation des écosystèmes et le maintien de la biodiversité peuvent représenter des moyens plus efficaces de lutter contre les changements climatiques que les biocarburants. Ils ont calculé les émissions de carbone évitées par les diverses matières premières cultivées pour l'éthanol et les biocarburants (comme la canne à sucre, le maïs, le blé et la betterave à sucre pour l'éthanol et le colza et la biomasse ligneuse pour le diesel), sur des terres agricoles existantes. Pour chacun des biocarburants, ils ont démontré que sur une période de 30 ans, davantage de carbone serait séquestré en convertissant les terres cultivées en forêts, et ce, pour chaque biocarburant. De plus, cette option peut contribuer par le fait même au maintien des autres biens et services écosystémiques. Toutefois, dans le système économique actuel, la conservation et la restauration des écosystèmes ne procurent que très rarement des bénéfices économiques directs, ce qui ne favorise pas cette option face aux autres utilisations du territoire. Logiquement, il s'avère beaucoup plus rentable pour les propriétaires terriens de convertir un

écosystème en cultures pour la production alimentaire ou la production d'énergie (résumé dans Igari *et al.*, 2009). C'est dans cette optique que la mise en place de mesures permettant d'inclure les services écosystémiques dans le système économique prend tout son sens. Bien que l'importance économique des services écosystémiques soit sans équivoque, il ne demeure pas moins que l'attribution d'une valeur économique aux écosystèmes représente un défi considérable, tout comme leur intégration dans les marchés (voir TEEB, 2008).

Comme il a été mentionné précédemment, les propriétaires terriens du Brésil sont dans l'obligation légale de maintenir une partie de leur propriété couverte par de la végétation indigène (voir section 2.8). Par ailleurs, les mesures réglementaires en matière de déforestation sont très restrictives et prévoient de fortes amendes au contrevenant (Igari *et al.*, 2009). Dans plusieurs cas, la faible application de la loi permet aux propriétaires de convertir sans conséquence les écosystèmes (Igari *et al.*, 2009). Les mesures répressives sont efficaces dans la mesure où elles découragent les propriétaires terriens à convertir les écosystèmes. Toutefois, ces mesures ne permettent pas aux propriétaires terriens d'obtenir des bénéfices économiques directs de la conservation et de la restauration des écosystèmes. Une option alternative repose sur le paiement pour les services écosystémiques (PES). Dans un système de PES, les propriétaires terriens sont payés pour les services écosystémiques que fournissent les écosystèmes qu'ils s'engagent à préserver ou restaurer. Théoriquement, lorsque les PES versés sont suffisants, la conservation des écosystèmes peut concurrencer les autres utilisations lucratives du territoire comme l'agriculture et l'exploitation forestière. Les initiatives de Réduction des émissions causées par la déforestation et la dégradation des forêts (REDD-Plus) sont un nouveau mécanisme de PES en cours de développement au niveau international. Le système de paiement pour la REDD-Plus permet d'attribuer une valeur financière à la séquestration du carbone qu'offrent les écosystèmes forestiers dans les pays en développement. Des études suggèrent que les mécanismes de paiement liés à la REDD-Plus concurrenceraient favorablement les autres utilisations du territoire (Olsen et Bishop, 2009), tout en générant un revenu bien nécessaire aux communautés rurales éloignées (TEEB, 2010).

Selon Finco et Doppler (2010), les mécanismes de paiement de la REDD-Plus pourraient servir d'instrument pour la préservation des forêts indigènes de l'Amazonie et du cerrado, tout en offrant une source alternative de revenus aux petits agriculteurs.

Enfin, si l'objectif principal des politiques sur les biocarburants est la réduction des émissions de GES et la lutte contre les changements climatiques, à court terme, les politiciens devraient plutôt concentrer leurs efforts sur l'efficacité énergétique, la conservation des forêts et des savanes existantes ainsi que la restauration de ces écosystèmes sur les terres agricoles qui ne sont pas nécessaires à la production alimentaire (Righelato et Spracklen, 2007). La déforestation et la dégradation forestière sont responsables d'environ 17 % des émissions globales de GES, ce qui est davantage que les émissions totales causées par le secteur des transports (GIEC, 2007). En plus de réduire les flux de carbone dans l'atmosphère, la préservation et la restauration des écosystèmes contribuent au maintien de nombreux biens et services écosystémiques (prévention de la désertification, fournitures de produits forestiers, régulation du climat à l'échelle régionale, etc.).

À long terme, il faudra indéniablement remplacer l'utilisation des carburants issus de combustibles fossiles par des carburants carbone neutre (Righelato et Spracklen, 2007). Le développement des biocarburants de troisième génération, produits à partir de biomasse lignocellulosique, constitue une avenue intéressante puisqu'ils peuvent être produits à partir d'une variété de ressources non alimentaires. La biomasse cellulosique est le matériau biologique le plus abondant sur Terre et elle est le principal constituant des déchets agricoles, forestiers et domestiques. Ces carburants peuvent être produits, entre autres, à partir de cultures non alimentaires comme le panic érigé et le jatropha qui s'accommodent de sols pauvres et dégradés se prêtant mal aux cultures vivrières (FAO, 2008a). Actuellement, certaines entreprises sont en mesure de produire de l'éthanol à partir de déchets domestiques.

Les biocarburants de troisième génération semblent prometteurs puisqu'ils possèdent généralement d'excellents bilans d'émissions de GES sans compter qu'ils permettent d'éviter les problèmes environnementaux associés à la monoculture intensive (Righelato et Spracklen, 2007). Par exemple, l'utilisation de la biomasse forestière pour la production de biocarburant peut être compatible avec le maintien d'un couvert forestier qui contribue à la rétention des stocks de carbone contenus dans les écosystèmes. Par contre, cette troisième génération de biocarburants est en cours de développement et de nombreuses recherches sont en cours afin d'évaluer la viabilité de cette filière. Un certain nombre de difficultés techniques doivent encore être surmontées avant que la production d'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique devienne commercialement rentable (FAO, 2008a). Enfin, davantage d'études portant sur les impacts environnementaux et l'utilisation du territoire pour ces biocarburants sont nécessaires (PNUE, 2009a).

Conclusion

Le présent essai a permis d'identifier les conséquences et les enjeux liés à la production et à l'utilisation d'éthanol de canne à sucre au Brésil, et ce, à la lumière de l'intérêt mondial croissant pour les biocarburants. La viabilité économique de la filière brésilienne est en partie due à la longue expérience dont bénéficie l'industrie en matière de production d'éthanol et de culture de la canne à sucre. La littérature démontre néanmoins qu'au fil du temps la prospérité de cette agro-industrie s'est établie en créant un déficit écologique, environnemental et social considérable. Cette étude approfondie de l'expérience brésilienne peut en effet servir de leçon aux pays en développement qui désirent importer le modèle brésilien. En considérant que ces pays sont pour la plupart aux prises avec des problèmes sociaux et écologiques comparables à ceux du Brésil, des risques tangibles guettent ces sociétés si le développement des biocarburants est mal encadré.

L'éthanol de canne à sucre est issu d'une agriculture intensive qui exerce des impacts considérables sur l'environnement et les écosystèmes. Au Brésil, l'utilisation de l'eau, la pollution de l'air et de l'eau, l'érosion des sols et la perte de biodiversité représentent des coûts environnementaux notables. L'expansion des cultures peut exercer des changements indirects dans l'affectation des terres qui mènent à la conversion des écosystèmes du Brésil. La destruction et la dégradation des milieux naturels peuvent nuire à la fourniture des biens et services écosystémiques comme la séquestration du carbone atmosphérique et la régulation des précipitations à l'échelle régionale. Afin d'exposer un bilan environnemental plus réaliste, les outils servant à évaluer la performance de l'éthanol devraient minimalement prendre en compte les changements indirects d'affectation du territoire et les questions liées à l'eau et la biodiversité.

Du point de vue social, le modèle agro-industriel brésilien n'est pas garant d'un développement rural et d'une distribution équitable des richesses. Au fil des années, l'industrie semble avoir entretenu un mépris envers les lois sociales pour accroître ses profits et sa rentabilité. Les conséquences de ce mépris sont graves puisqu'elles contribuent aux inégalités sociales qui règnent dans le pays. L'exploitation des travailleurs, le travail des enfants, les problèmes de santé publique liés au brûlage des cultures et les pertes d'emplois liées à la mécanisation sont des coûts sociaux qui hypothèquent grandement la société brésilienne et qui pèsent sur l'économie des ménages. Par ailleurs, l'industrie de l'éthanol contribue à la concentration de la terre et à l'insécurité alimentaire au Brésil. Ces impacts sont inacceptables puisque les problèmes d'accès à la terre et d'insécurité alimentaire sévissent toujours dans les régions rurales du Brésil.

Afin de répondre aux exigences des marchés internationaux, l'industrie de l'éthanol devra passer par des changements majeurs afin d'améliorer son bilan socio-environnemental. En fait, cet essai démontre clairement que la rentabilité de l'éthanol brésilien dépend du prix élevé du pétrole et de pratiques non durables qui permettent de maintenir des coûts de production à un niveau très bas. Un calcul économique exhaustif prenant en compte l'ensemble des coûts écologiques, environnementaux et sociaux pourrait véritablement remettre en question la viabilité de la filière brésilienne de l'éthanol.

Malgré tous les avantages économiques et énergétiques que peuvent représenter les biocarburants, il est nécessaire de mettre leur expansion dans une perspective globale. À cet égard, les biocarburants ne semblent pas représenter une solution durable pour faire face aux grands défis environnementaux et sociaux tels que la perte de biodiversité, les changements climatiques, la pauvreté et l'insécurité alimentaire. Au contraire l'augmentation à grande échelle des cultures énergétiques risquerait d'augmenter la concurrence entre carburants et nourriture pour l'utilisation des ressources agricoles. Cette question est d'autant plus importante que les terres agricoles ne pourront s'accroître indéfiniment sans que des impacts

irréversibles se produisent sur la biodiversité. À court terme, la conservation et la restauration des écosystèmes, ainsi que l'efficacité énergétique, semblent représenter des mesures plus efficaces pour lutter contre les changements climatiques et la perte de biodiversité. À long terme, le développement des biocarburants liquides de troisième génération semble prometteur pour remplacer en partie les carburants fossiles utilisés pour le transport.

En 2007, le rapporteur spécial des Nations Unies sur la sécurité alimentaire, Jean Ziegler, soulignait dans son rapport les nombreuses incertitudes associées à la demande grandissante en biocarburants. Il recommandait alors à la communauté internationale d'observer un moratoire de cinq ans sur la production de biocarburants issus de cultures vivrières à l'échelle mondiale. Les pays ont décidé de ne pas imposer le moratoire recommandé. L'étude de la situation brésilienne fait ressortir les coûts, les enjeux ainsi que les incertitudes associées aux biocarburants issus de ressources agricoles. Le temps semble avoir donné raison à Jean Ziegler. L'avancée fulgurante de cette filière semble davantage motivée par les objectifs de sécurité énergétique des gouvernements et les profits des grandes agro-industries. Les bénéfices environnementaux et les retombées sociales pour les populations pauvres sont souvent dérisoires. En suivant le présent modèle de développement, l'expansion des biocarburants dans les pays du sud continuera de s'exercer au détriment des populations les moins bien nanties et des écosystèmes dont ils dépendent. Les biocarburants actuels sont développés selon un modèle économique non durable et non équitable qui justifie toujours la tenue d'un moratoire.

Liste des références

- Alho, C.R.J. (2008a). Biodiversity of the Pantanal: response to seasonal flooding regime and to environmental degradation. *Braz. J. Biol.* 68, 957-966.
- Alho, C.R.J. (2008b). The value of biodiversity. *Braz. J. Biol.* 68, 1115-1118.
- Allen, A.G., Cardoso, A.A. et da Rocha, G.O. (2004). Influence of sugar cane burning on aerosol soluble ion composition in Southeastern Brazil. *Atmos. Environ.* 38, 5025-5038.
- Alves, F. (2006). Por que morrem os cortadores de cana? Why are the sugar cane harvesters dying? *Saúde soc.* 15, 90-98.
- Amaral, W.A.N., Marinho, J.P., Tarasantchi, R., Beber, A. et Giuliani, E. (2008). Environmental sustainability of sugarcane ethanol in Brazil. Dans *Sugarcane Ethanol Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment*, P. Zuurbier et J. van de Vooren, édés. (Wageningen : Wageningen Academic Publishers), pp. 113-138.
- Arbex, M.A., Bhon, G.M., Saldiva, P.H.N., Conceicao, G.M.S., Pope, A.C. et Braga, A.L. (2000). Assessment of the effects of sugarcane plantation burning on daily counts of inhalation therapy. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 50, 1745-1749.
- Arbex, M.A., Martins, L.C., de Oliveira, R.C., Pereira, L.A.A., Arbex, F.F., Cançado, J.E.D., Saldiva, P.H.N. et Braga, A.L.F. (2007). Air pollution from biomass burning and asthma hospital admissions in a sugar cane plantation area in Brazil. *J. Epidemiol. Commun. Health* 61, 395-400.

- Azevedo, D.A., Santos, C.Y.M. et Neto, F.R.A. (2002). Identification and seasonal variation of atmospheric organic pollutants in Campos Dos Goytacazes Brazil. *Atmos. Environ.* 36, 2383-2395.
- Ballester, M.V., Martinelli, L.A., Krusche, A.V., Victoria, R.L., Bernardes, M. et de Camargo, P.B. (1999). Effects of increasing organic matter loading on the dissolved O₂, free dissolved CO₂ and respiration rates in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil. *Water Res.* 33, 2119-2129.
- Bayer, C., Martin-Neto, L., Mielniczuk, J., Pavinato, A. et Dieckow, J. (2006). Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Tillage Res.* 86, 237-45.
- Berndes, G. (2002). Bioenergy and water, the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. *Global Environ. Change* 12, 253-271.
- Cançado, J.E.D., Saldiva, P.H.N., Pereira, L.A.A., Lara, L.B.L.S., Artaxo, P., Martinelli, L.A., Arbex, M.A., Zanobetti, A. et Braga, A.L.F. (2006). The Impact of Sugar Cane-Burning Emissions on the Respiratory System of Children and the Elderly. *Environ. Health Perspect.* 14, 725-729.
- Carneiro, F.F., Tambellini, A.T., da Silva, J.A., Haddad, J.P.A., Búrigo, A.C., de Sá, W.R., Viana, F.C. et Bertolini V.A. (2008). Health of families from the Landless Workers' Movement and temporary rural workers, Brazil, 2005. *Rev. Saúde Pública* 42, 1-7.
- CDB (Convention sur la diversité biologique). (2010). Profil de pays, Brésil. <http://www.cbd.int/countries/profile.shtml?country=br#status>. 20 septembre 2010.

- Cerdeira, A.L., Desouza, M.D., Queiroz, S.C.N., Ferracini, V.L., Bolonhezi, D., Gomes, M.A.F., Rosa, M.A., Balderrama, O., Rampazzo, P., Queiroz, S.C.N. *et al.* (2007). Leaching and half-life of the herbicide tebuthiuron on a recharge area of Guarany aquifer in sugarcane fields in Brazil. *J. Environ. Sci. Health Part B* 42, 635-639.
- Cerdeira, A.L., Santos, N.A.G., Pessoa, M.C.P.Y., Gomes, M.A.F. et Lanchote, V.L. (2005). Herbicide leaching on a recharge area of the guarany aquifer in Brazil. *J. Environ. Sci. Health Part B* 40, 159-165.
- Corbi, J.J., Strixino, S.T., dos Santos, A. et Grande, M.D. (2006). Diagnóstico ambiental de metais e organoclorados em córregos adjacentes a áreas de cultivo de cana-de-açúcar (estado de São Paulo, Brasil). *Quim. Nova* 29, 61-65.
- Cotula, L., Dyer, N. et Vermeulen, S. (2008). Fuelling exclusion? The biofuels boom and poor people's access to land. (Londres : IIED).
- Crutzen, P.J. et Andreae, M.O. (1990). Biomass burning in the tropics : impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science* 250,1669-1678.
- Dantas, A.D.B., Paschoalato, C.F.P.R., Ballejo, R.R. et Di Bernando, L. (2009). Pré-oxidação e adsorção em carvão ativado granular para remoção dos herbicidas Diuron e Hexazinona de água subterrânea. *Eng. Sanit. Ambient.* 14, 373-380.
- De Almeida, E.F., Bomtempo, J.V. et De Souza E Silva, C.M. (2007). The Performance of Brazilian Biofuels : An Economic, Environmental and Social Analysis. Discussion Paper No. 2007-5. (Rio de Janeiro : OECD/ITF Joint Transport Research Centre).

- de Armas, E.D., Monteiro, R.T.R., Amâncio, A.V., Correa R.M.L. et Guercio, M.A. (2005).
Uso de agrotóxicos em cana-de-açúcar na bacia do rio corumbataí e o risco de
poluição hídrica. *Quim. Nova* 28, 975-982.
- de Armas, E.D., Monteiro, R.T.R., Antunes, P.M., dos Santos, M.A.P.F., de Camargo, P.B. et
Abakerli, R.B. (2007). Diagnóstico espaço-temporal da ocorrência de herbicidas nas
águas superficiais e sedimentos do Rio Corumbataí e principais afluentes. *Quim.
Nova* 30, 1119-1127.
- De Medeiros, L.S. (2007). Social Movements and the Experience of Market-led Agrarian
Reform in Brazil. *TWQ* 28, 1501-1518.
- de Resende, A.S., Xavier, R.P., de Oliveira, O.C., Urquiaga, S., Alves, B.J.R. et Boddey, R.M.
(2006). Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse
applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a
plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. *Plant Soil* 281, 339-351.
- DIEESE (Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos). (2009).
Salário mínimo nominal e necessário.
<http://www.dieese.org.br/rel/rac/salminMenu09-05.xml>. 26 abril 2009.
- Dufey, A. (2008). Impacts of sugarcane bioethanol towards the Millennium Development
Goals. Dans *Sugarcane Ethanol Contributions to Climate Change Mitigation and the
Environment*, P. Zuurbier et J. van de Vooren, éds. (Wageningen : Wageningen
Academic Publishers), pp. 199-225.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). (2009). Zoneamento
Agroecológico da Cana-de Açúcar, Expandir a produção, preservar a vida, garantir o
futuro. (Rio de Janeiro : Embrapa solos).

- ESMAP (Energy Sector Management Assistance Programme). (2005). Potential for Biofuels for Transport in Developing Countries (Washington: ESMAP c/o Energy and Water Department, The World Bank Group).
- Faaij, A., Szwarc, A. et Walter, A. (2008). Demand for bioethanol for transport. Dans Sugarcane Ethanol Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment, P. Zuurbier et J. van de Vooren, éd. (Wageningen: Wageningen Academic Publishers), pp. 139-157.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2008a). La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture – Biocarburants : perspectives, risques et opportunités. (Rome : FAO).
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2008b). L'état de l'insécurité dans le monde 2008 – Prix élevés des denrées alimentaires et sécurité alimentaire menaces et perspectives. (Rome : FAO).
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2009a). La situation des marchés des produits agricoles 2009 – Flambée des prix et crise alimentaire expériences et enseignements (Rome : FAO).
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2009b). L'état de l'insécurité dans le monde 2009 – Crises économiques répercussions et enseignements. (Rome : FAO).
- Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S. et Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319, 1235-1238.

- Finco, M.V.A. et Doppler, W. (2010). Bioenergy and sustainable development: The dilemma of food security and climate change in the Brazilian savannah. *Energy for Sustainable Development* 14, 194-199.
- Fiorio, P.R., Demattê, J.A.M. et Sparovek, G. (2000). Cronologia e impacto ambiental do uso da terra na Microbacia Hidrográfica do Ceveiro. *Pesq. Agropec. Bras.* 35, 671-679.
- Fischer, G., Teixeira, E., Hizznyik, E.T. et van Velthuizen, H. (2008). Land use dynamics and sugarcane production. Dans *Sugarcane Ethanol Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment*, P. Zuurbier et J. van de Vooren, éd. (Wageningen : Wageningen Academic Publishers), pp. 29-62.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. (Genève : GIEC).
- Godoi, A.F.L., Ravindra, K., Godoi, R.H.M., Andrade, S.J., Santiago-Silva, M., Vaeck, L.V. et Grieken, R.V. (2004). Fast chromatographic determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosol samples from sugar cane burnings. *J. Chromatogr. A* 1027, 49-53.
- Goldemberg, J., Coelho, S.T. et Guardabassi, P. (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy* 36, 2086-2097.
- Gomes, A.O. et Azevedo, D.A. (2003). Aliphatic and aromatic hydrocarbons in tropical recent sediments of Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil. *J. Braz. Chem. Soc.* 14, 358-368.

- Gomes, M.A.F., Spadotto, C.A. et Lanchotte, V.L. (2001). Ocorrência do herbicida tebuthiuron na água subterranean da microbacia do correço Espraiado Ribeirão Preto, SP. *Pesticidas: R. Ecotoxicol. e Meio Ambiente* 11, 65-76.
- Gunkel, G., Kosmol, J., Sobral, M., Rohn, H., Montenegro, S. et Aureliano, J. (2007). Sugar Cane Industry as a Source of Water Pollution – Case Study on the Situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. *Water Air Soil Pollut.* 180, 261-269.
- Hartemink, A.E. (2008). Sugarcane for Bioethanol: Soil and Environmental Issues. *Adv. Agron.* 99, 125-182.
- Hazell, P. (2006). Developing bioenergy: A win-win approach that can serve the poor and the environment. Dans *Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges – Focus 14*, P. Hazell and R.K. Pachauri, éds. (Washington : International Food Policy Research Institute), Brief 12 de 12.
- Hirata, R., Suhogusoff, A. et Fernandes, A. (2007). Groundwater resources in the State of São Paulo (Brazil) : the application of indicators. *An. Acad. Bras. Ciênc.* 79, 141-152.
- IEA (International energy agency). (2009). Key world energy statistics. http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf. 8 avril 2010.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). (2011a). Mapeamento da degradação florestal na Amazônia. DEGRAD. <http://www.obt.inpe.br/deggrad/>. 19 janvier 2011.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). (2011b). Projeto PRODES. Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por satélite. Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2010. http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2010.htm. 19 janvier 2011.

- Igari, A.T., Tambosi L.R. et Pivello, V.R. (2009). Agribusiness Opportunity Costs and Environmental Legal Protection : Investigating Trade-Off on Hotspot Preservation in the State of São Paulo, Brazil. *Environ. Manage.* *44*, 346-355.
- Kemper, K.E., Mestre, E. et Amore, L. (2003). Management of the Guarani Aquifer System Moving Towards the Future. *Water Int.* *28*, 185-200.
- Klink, C.A. et Machado, R.B. (2005). Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conserv. Biol.* *17*, 707-713.
- Laluce, C. (1991). Current Aspects of Fuel Ethanol Production in Brazil. *Crit. Rev. Biotechnol.* *11*, 149-161.
- Lapola, D.M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C. et Priess, J.A. (2010). Indirect land use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *PNSA* *107*, 3388-3393.
- Lara, L.B.L.S., Artaxo, P., Martinelli, L.A., Victoria, R.L., Camargo, P.B., Krusche, A., Ayers, G.P., Ferraz, E.S.B. et Ballester M.V. (2001). Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil. *Atmos. Environ.* *35*, 4937-4945.
- Lara, L.L., Artaxo, P., Martinelli, L.A., Camargo, P.B., Victoria, R.L. et Ferraza, E.S.B. (2005). Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmos. Environ.* *39*, 4627-4637.

- Leite, R.C.C., Leal, M.R.L.V., Cortez, L.A.B., Griffin, W.M. et Scandiffio, M.I.G. (2009). Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? *Energy Policy* 34, 655-661.
- Macedo, I.C., Seabra, J.E.A. et Silva, J.E.A.R. (2008). Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass Bioenergy* 32, 582-595.
- Machado, R.B., Paglia, A.P. et Fonseca, R.L. (2006). Areas e paisagens prioritarias no Cerrado, Pantanal e Amazonia. Rapport présenté au groupe de travail sur A Expansão da Agroenergia e seus impactos sobre os Ecossistemas Brasileiros, 26-27 Mars 2007. Rio de Janeiro, Brasil, FBDS.
http://fbds.org.br/fbds/Apresentacoes/6_Areas_Cerrado_Pant_Amaz_Paglia.pdf.
20 octobre 2010.
- Martinelli, L.A. et Filoso, S. (2008). Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. *Ecol. Appl.* 18, 885-898.
- Martines-Filho, J., Burnquist, H.L. et Vian, E.F.C. (2006). Bioenergy and the rise of sugarcane-based ethanol in Brazil. *Choices* 21, 91-96.
- Matsuoka, S., Ferro, J. et Arruda, P. (2009). The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant* 45, 372-381.
- Mazzoli-Rocha, F., Magalhães, C.B., Malm, O., Saldiva, P.H.N., Zin, W.A. et Faffe, D.S. (2008). Comparative respiratory toxicity of particles produced by traffic and sugar cane burning. *Environ. Res.* 108, 35-41.

- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. (Washington : Island Press).
- Mendonça, M.L. (2006). The WTO and the Destructive Effects of the Sugarcane Industry in Brazil. <http://www.landaction.org/display.php?article=405>. 19 janvier 2011.
- Michellon, E., Santos, A.A.L. et Rodrigues, J.R.A. (2008). Breve Descrição do Proálcool e Perspectivas Futuras para o Etanol Produzido no Brasil. Résumé de conférence présenté lors du 46^e congrès de la Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia, 20 au 23 juillet 2008. Rio Branco, Brésil, SOBER. <http://www.sober.org.br/palestra/9/574.pdf>. 15 février 2009.
- Moreira, J.R. et Goldemberg, J. (1999). The alcohol program. *Energy Policy* 27, 229-245.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B. et Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403, 853-858.
- Nass, L.L., Pereira, P.A.A. et Ellis, D. (2007). Biofuels in Brazil: An Overview. *Crop Sci.* 47, 2228-2237.
- Nassar, A.M., Rudorff, B.F.T., Antoniazzi, L.B., de Aguiar, D.A., Bacchi, M.R.P. et Adami, M. (2008). Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. Dans *Sugarcane Ethanol Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment*, P. Zuurbier et J. van de Vooren, édés. (Wageningen : Wageningen Academic Publishers), pp. 63-93.

- OCDE et FAO (Organisation de co-opération et de développement économiques et Organisation de Nation Unies pour l'alimentation et l'agriculture). (2010). Perspectives de l'OCDE et de la FAO 2010-2019 – Synthèse. <http://www.agri-outlook.org/dataoecd/9/0/45447792.pdf>. 16 janvier 2010.
- Olsen, N. et Bishop, J. (2009). The Financial Costs of REDD: Evidence from Brazil and Indonesia. (Gland: IUCN).
- ONU (Organisation des Nations Unies). (2011). Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2008 Revision. <http://esa.un.org/unpp>. 13 janvier 2011.
- OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries). (2011). OPEC Basket Price. http://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/40.htm. 13 janvier 2011.
- Oppenheimer, C., Tsanev, V. I., Allen, A.G., McGonigle, A.J.S., Cardoso, A.A., Wiatr, A., Paterlini, W. et Dias. C.M. (2004). NO₂ emissions from agricultural burning in São Paulo, Brazil. *Environ. Sci. Technol.* 38, 4557-4561.
- Peskett, L., Slater, R., Stevens, C. et Dufey, A. (2007). Biofuels, Agriculture and Poverty Reduction. *ODI Natural Resource Perspective 107*, 1-6.
- PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement). (2010). Rapport sur le développement humain 2010. (New York : PNUD).
- PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). (2009a). Towards sustainable production and use of resources: assessing biofuels. (Nairobi: PNUE).

- PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement). (2009b). Vers la production et l'utilisation durables des ressources : L'évaluation des biocarburants – rapport synthèse. (Nairobi: PNUE).
- Queiroz, S.C.N., Ferracini, V.L., Gomes, M.A.F. et Rosa, M.A. (2009). Comportamento do herbicida hexazinone em área de recarga do aquífero Guarani cultivada com cana-de-açúcar. *Quim. Nova* 32, 378-381.
- Rabelo, J.L. et Wendland, E. (2009). Assessment of groundwater recharge and water fluxes of the Guarani Aquifer System, Brazil. *Hydrogeol. J.* 17, 1733-1748.
- Rask, K. (1995). The Social Costs of Ethanol Production in Brazil: 1978-1987. *Econ. Dev. Cult. Change* 43, 627-649.
- RFA (Renewable Fuels Agency). (2008). The Gallagher review of the indirect effects of biofuel production. (Londres : RFA).
- Righelato, R. et Spracklen, D.V. (2007). Environment: carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests? *Science* 317, 902.
- Rocha, F.L.R., Marziale, M.H.P. et Robazzi, M.L.C.C. (2007). Poverty as a predisposing factor of illness tendencies in sugar cane workers. *Rev. Latino-am. Enfermagem* 15, 736-741.
- Rodrigues, D. et Ortiz, L. (2006). Case study sugar cane ethanol from Brazil. (São Paulo : Núcleo Amigos da Terra (NAT), Vitea Civilis Institute).

Rosillo-Calle, F. et Cortez, L.A.B. (1998). Towards proalcool II – A review of the Brazilian bioethanol programme. *Biomass Bioenergy* 14, 115-124.

Rothkopf, G. (2007). A Blueprint for Green Energy in the Americas: Strategic Analysis of Opportunities for Brazil and the Hemisphere, *The Global Biofuels Outlook 2007*. (Washington : Inter-American Development Bank).

RS-Biodiversidade (Rio Grande do sul - Biodiversidade) (2010). Mapas.

<http://www.biodiversidade.rs.gov.br/portal/index.php?acao=downloads&id=2>.
29 juillet 2010.

Santos, C.Y.M., Azevedo, D.A. et Neto, F.R.A. (2002). Selected organic compounds from biomass burning found in the atmospheric particulate matter over a sugar cane plantation areas. *Atmos. Environ.* 36, 3009-3019.

Sawyer, D. (2008). Climate change, biofuels and eco-social impacts in the Brazilian Amazon and Cerrado. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B.* 363, 1747-1752.

SCDB (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique). (2006). Deuxième édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique.

<http://www.cbd.int/doc/gbo/gbo2/cbd-gbo2-fr.pdf>. 28 juillet 2010.

SCDB (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique). (2010). Troisième édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique.

<http://www.cbd.int/doc/publications/gbo/gbo3-final-fr.pdf>. 28 juillet 2010.

Scharlemann, J.P.W. et Laurence, W.L. (2008). How Green Are Biofuels? *Science* 319, 43-44.

- Schwartzman S. et Schwartzman F.F. (2004). O Trabalho Infantil no Brasil.
http://www.schwartzman.org.br/simon/pdf/trab_inf2004.pdf. 18 janvier 2011.
- Silva, A.M., Nalon, M.A., Kronka, F.J.N., Alvares, C.A., de Camargo, P.B. et Martinelli. L.A. (2007). Historical land-cover/use in different slope and riparian buffer zones in watersheds of the state of São Paulo, Brazil. *Sci. Agric.* *64*, 325-335.
- Silva, D.L.M., de Camargo, P.B., Martinelli, L.A., Lanças, F.M., Pinto, J.S.S. et Avelar, W.E.P. (2008). Organochlorine pesticides in the Piracicaba river basin (São Paulo-Brazil): a survey of sediment, bivalves, and fish. *Quim. Nova* *31*, 214-219.
- Silveira, A.M., Victoria, R.L., Ballester, M.V., De Camargo, P.B., Martinelli, L.A. et Piccolo, M.C. (2000). Simulation of the effects of land use changes in soil carbon dynamics in the Piracicaba river basin, São Paulo State, Brazil. *Pesq. agropec. bras.* *35*, 389-399.
- Sparovek, G. et Schnug, E. (2001a). Soil tillage and precision agriculture: A theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. *Soil Tillage Res.* *61*, 47-54.
- Sparovek, G. et Schnug, E. (2001b). Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* *65*, 1479-1486.
- Sparovek, G., Ranieri, S.B.L., Gassner, A., De Maria, I.C., Schnug, E., dos Santos, R.F. et Joubert, A. (2002). A conceptual framework for the definition of the optimal width of riparian forests. *Agric. Ecosyst. Environ.* *90*, 169-175.
- Smeets, E., Faaij A. et Lewandowski, I. (2005). The impact of sustainability criteria on the costs and potentials of bioenergy production – An exploration of the impact of the

implementation of sustainability criteria on the costs and potential of bioenergy production, applied for case studies in Brazil and Ukraine. (Utrecht : Utrecht University, Copernicus Institute).

Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A., Dolzan, P. et Turkenburga, W. (2008). The sustainability of Brazilian ethanol – An assessment of the possibilities of certified production. *Biomass Bioenergy* 32, 781-813.

Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A. et Dolzan, P. (2006). Sustainability of Brazilian bio-ethanol. (Utrecht : Utrecht University, Copernicus Institute).

TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). (2008). L'économie des écosystèmes et de la biodiversité. Rapport d'étape. (Luxembourg: Office des publications officielles des Communautés européennes).

TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity). (2010) L'économie des écosystèmes et de la biodiversité : Intégration de l'Économie de la nature. Une synthèse de l'approche, des conclusions et des recommandations de la TEEB. (Malte : Progress Press).

Tundisi, J.G, Matsumura-Tundisi, T. et Abe, D.S. (2008). The ecological dynamics of Barra Bonita (Tietê River, SP, Brazil) reservoir: implications for its biodiversity. *Braz. J. Biol.* 6, 1079-1098.

UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture). (2001). Internationally Shared (Transboundary) Aquifer Resources Management – Their significance and sustainable management – A framework document. (Paris : Unesco).

- Uriarte, M., Yackulic, C.B., Cooper, T., Flynn, D., Cortes, M., Crk, T., Cullman, G., McGinty, M. et Sircely, J. (2009). Expansion of sugarcane production in São Paulo, Brazil: Implications for fire occurrence and respiratory health. *Agric. Ecosyst. Environ.* 132, 48-56.
- USDS (United States Department of State). (2006). 2005 Country Reports on Human Rights Practices, Brazil. <http://www.state.gov/g/drl/rls/hrrpt/2005/61718.htm>. 25 avril 2009.
- van den Wall Bake, J.D., Junginger, M., Faaij, A., Poot, T. et Walter, C. (2009). Explaining the experience curve: Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane. *Biomass Bioenergy* 33, 644-658.
- Varghese, S. (2007). Biofuels and Global Water Challenges. Institute for Agriculture and Trade Policy. <http://iatp.org/iatp/publications.cfm?refid=100547>. 14 mai 2009.
- Walter, A., Rosillo-Calle, F., Dolzan, P., Piacente, E. et da Cunha, K.B. (2008). Perspectives on fuel ethanol consumption and trade. *Biomass Bioenergy* 32, 730-748.
- Webb, T.J., Woodward, F.I., Hannah, L. et Gaston, K.J. (2005). Forest cover-rainfall relationships in a biodiversity hotspot : The atlantic forest of Brazil. *Ecol. Appl.* 15, 1968-1983.
- WWF-Brazil (World Wildlife Fund - Brazil). (2008). Analysis of sugar cane agriculture industry expansion in Brazil. Agriculture and Environment Programme. http://assets.panda.org/downloads/report_sugarcane_wwf_brasil_jun2008.pdf. 3 décembre 2009.
- Wittman, H. (2009). Reframing agrarian citizenship: Land, life and power in Brazil. *J. Rural. Stud.* 25, 120-130.

WWF (World Wildlife Fund). (2001). Ecoregions, Pantanal.

http://www.worldwildlife.org/wildworld/profiles/terrestrial/nt/nt0907_full.html.

3 octobre 2010.

Zah, R., Böni, H., Gauch, M., Hirsch, R., Lehmann, M. et Wäger, P. (2008). Ecobilan d'agents énergétiques: Évaluation écologique de biocarburants (rapport final). *Revista Virtual REDESMA* 2, 31-48.

Ziegler, J. (2007). Rapport du Rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation à l'Assemblée générale des Nations Unies. <http://daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N07/487/06/PDF/N0748706.pdf?OpenElement>.

15 octobre 2009.

Zinn, Y.L., Lal, R. et Resck. D.V.S. (2005). Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Soil Tillage Res.* 84, 28-40.

Zuurbier, P. et van de Vooren, J. (2008). Introduction to sugarcane ethanol contributions to climate change mitigation and the environment. Dans *Sugarcane Ethanol Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment*, P. Zuurbier et J. van de Vooren, éd. (Wageningen : Wageningen Academic Publishers), pp. 19-27.