

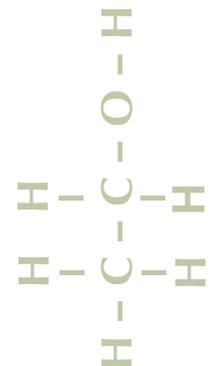
Bioéthanol de Canne à Sucre Énergie pour le Développement Durable

Coordination
BNDES et CGEE

www.bioethanoldecanne.org

1^{ère} Édition

Rio de Janeiro – Mai 2008



B615b Bioéthanol de canne à sucre : énergie pour le développement durable / coordination BNDES et CGEE. – Rio de Janeiro : BNDES, 2008.

316 p.

ISBN : 978-85-87545-25-1

1. Bioénergie. 2. Biocarburant. 3. Bioéthanol. 4. Canne à sucre. I. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. II. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

CDD 333.953

Equipe technique

Coordination – BNDES et CGEE

BNDES

Armando Mariante Carvalho Junior
Júlio Cesar Maciel Ramundo
Carlos Eduardo de Siqueira Cavalcanti
Paulo de Sá Campello Faveret Filho (supervisão)
Nelson Isaac Pfefer (supervisão)
Sergio Eduardo Silveira da Rosa
Artur Yabe Milanez

CGEE

Antonio Carlos Galvão
Marcelo Khaled Poppe

Organisation et responsabilité technique

Luiz Augusto Horta Nogueira – *Unifei*

Rédaction et consultance

Luiz Augusto Horta Nogueira – *Unifei*
Joaquim Eugênio Abel Seabra – *Unicamp*
Gustavo Best – *consultor FAO/Cepal*
Manoel Regis Lima Verde Leal – *Cenea*
Marcelo Khaled Poppe – *CGEE*

Collaboration institutionnelle – Cepal et FAO

Cepal

Adrián Rodríguez
José Javier Gómez
Joseluis Samaniego
Manlio Coviello
Martine Dirven

FAO

Alberto Saucedo
Guilherme Schuetz

Remerciements

Adhemar Altieri – *Unica*
Alfred Szwarc – *Unica*
Aluysio Antonio da Motta Asti – *BNDES*
André Correa do Lago – *MRE*
Antonio Barros de Castro – *BNDES*
Antonio Dias Leite – *consultor*
Arnaldo Vieira de Carvalho – *BID*
Edmar Fagundes de Almeida – *UFRJ*

Isaias de Carvalho Macedo – *Unicamp*
João Carlos Ferraz – *BNDES*
Luis Augusto Barbosa Cortez – *Unicamp*
Marcio Nappo – *Unica*
Rafael Capaz – *Unifei*
Rafael Pontes Feijó – *BNDES*
Rogério Cezar de Cerqueira Leite – *Unicamp*
Tammy Klein – *IFQC*

Remerciements pour la revision de la traduction en français:

Philippe Petithuguenin – *Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad)*
Régis Goebel – *Cirad*
Francisco Poppe – *Mission économique, Ambassade de France à Brasilia*
Mayra Juruá G. de Oliveira – *CGEE*
Marcelo Poppe – *CGEE*

Sommaire

Préface 13

Présentation 17

1 Bioénergie et biocarburants 23

- 1.1 Fondements de la bioénergie 25
- 1.2 Évolution de la bioénergie et des biocarburants 32

2 L'éthanol comme carburant pour véhicules 39

- 2.1 Les dimensions techniques et environnementales de l'utilisation de l'éthanol 41
- 2.2 Aspects économiques et institutionnels de l'éthanol combustible 54
- 2.3 Chaînes logistiques pour l'éthanol 61

3 Production de bioéthanol 69

- 3.1 Matières premières et technologies de production du bioéthanol 71
- 3.2 Bioéthanol de canne à sucre 74
- 3.3 Bioéthanol de maïs 85
- 3.4 Bioéthanol à base d'autres matières premières 91
- 3.5 Productivité, émissions et bilans énergétiques 94

4 Coproduits du bioéthanol de canne à sucre 105

- 4.1 Sucre et dérivés 107
- 4.2 Bioélectricité 110
- 4.3 Autres coproduits du bioéthanol de canne à sucre 120

5 Futures technologies de l'agro-industrie de la canne à sucre 127

- 5.1 Hydrolyse de résidus lignocellulosiques 129
- 5.2 Gazéification pour la production de combustibles et d'électricité 137
- 5.3 Utilisation de bioéthanol comme intrant pétrochimique ou alcool chimique 145
- 5.4 Production de plastiques biodégradables 148
- 5.5 Bioraffinerie : produits multiples et utilisation intégrale de la matière première 152

6 Le bioéthanol de canne à sucre au Brésil 157

- 6.1 Evolution du bioéthanol combustible au Brésil 159
- 6.2 L'agro-industrie de la canne à sucre au Brésil 168
- 6.3 Recherche et développement technologique 175

7 Durabilité du bioéthanol de canne à sucre : l'expérience brésilienne 185

- 7.1 L'environnement et l'énergie de la canne à sucre 187
- 7.2 Utilisation du sol 203

- 7.3 Viabilité économique du bioéthanol de canne à sucre 211
- 7.4 Création d'emplois et de revenu dans l'agro-industrie du bioéthanol 217
- 7.5 Certification et durabilité de l'agro-industrie du bioéthanol 225

8 Perspectives pour un marché mondial des biocarburants 231

- 8.1 Potentiel global pour la production de biocarburants 233
- 8.2 Offre et demande en biocarburants : situation actuelle 240
- 8.3 Projections pour l'offre et la demande en bioéthanol, en 2010–2015 245
- 8.4 Politiques de soutien et d'encouragement aux biocarburants 260
- 8.5 Connexions entre alimentation et bioénergie 263
- 8.6 Facteurs d'induction pour un marché global de bioéthanol 275

9 Une vision de l'avenir pour le bioéthanol combustible 283

Annexes 293

Références 299

Index de boîtes, figures, graphiques et tableaux

Boîtes

- L'éthanol dans les moteurs aéronautiques 53
- Les possibilités du sucre organique 109
- Evolution de la production d'électricité dans une usine brésilienne 118
- Premiers pas de l'éthanol-chimie au Brésil 147
- Amélioration génétique et disponibilité de cultivars 177

Figures

- 1 Le processus de la photosynthèse 26
- 2 Moyenne annuelle de pluviosité 28
- 3 Routes technologiques pour la production de bioénergie 32
- 4 Solubilité de l'eau dans les mélanges essence/éthanol 48
- 5 Modèle de production, stock et demande de l'éthanol 62
- 6 Logistique de l'essence et de l'éthanol au Brésil 63
- 7 Solutions technologiques pour la production d'éthanol 72
- 8 Structure typique de la biomasse de la canne 74
- 9 Distribution des 350 usines de traitement de la canne à sucre au Brésil 77
- 10 Diagramme de flux de la production de sucre et de bioéthanol de canne 81
- 11 Structure typique de la biomasse de maïs 86
- 12 Distribution de la production de maïs aux États-Unis 87
- 13 Diagramme de flux du processus par voie humide pour la production de bioéthanol à base de maïs 89
- 14 Diagramme de flux du processus de voie sèche pour la production de bioéthanol de maïs 90
- 15 Diagramme du cycle de vie d'un biocarburant 95
- 16 Analyse de sensibilité pour l'utilisation et rapport d'énergie pour le bioéthanol de canne à sucre dans le scénario actuel (2005/2006) 99
- 17 Analyse de sensibilité pour les émissions de GEE pour le bioéthanol de canne à sucre dans le scénario actuel (2005/2006) 100
- 18 Configuration habituelle du système de cogénération dans l'agro-industrie de la canne à sucre 112
- 19 Schéma du processus de production de l'éthanol au moyen de l'hydrolyse de la biomasse 130
- 20 Représentation schématique d'un système BIG-CC 140
- 21 Fluxogramme général pour la production de méthanol, d'hydrogène et de diesel via gazéification de biomasse (Fischer Tropsh) 142

- 22 Diagramme de flux de la production de PHB à base de sucre de canne 151
- 23 Cycle intégré complet agro-biocarburant-biomatériau-bioénergie pour les technologies durables 153
- 24 Localisation des nouvelles usines de sucre et d'éthanol au Brésil 171
- 25 Occupation en pourcentage des principales variétés de canne à sucre au Brésil de 1984 à 2003 178
- 26 Exemple d'image de satellite utilisée dans la surveillance de la couverture végétale 200
- 27 Potentiel pour la culture de la canne sans irrigation 207
- 28 Potentiel pour la culture de la canne avec irrigation de secours 208
- 29 Zones de culture de canne à sucre 209
- 30 Vue générale des principaux éléments utilisés dans la méthodologie d'évaluation du potentiel bioénergétique 234
- 31 Contribution de la bioénergie à l'offre primaire et secondaire d'énergie en 2007 241

Graphiques

- 1 Utilisations de la surface cultivable sur la Terre 29
- 2 Part de la bioénergie dans l'offre interne d'énergie au Brésil 34
- 3 Contribution de la bioénergie en fonction du revenu *per capita* 36
- 4 Évolution des émissions de véhicules neufs au Brésil 50
- 5 Prix d'indifférence de l'éthanol anhydre en fonction du prix du sucre 56
- 7 Prix d'indifférence de l'éthanol face au sucre et au prix international de l'essence 58
- 8 Productivité moyenne de l'éthanol par surface pour différentes cultures 73
- 9 Distribution de la production mondiale d'éthanol en 2006 73
- 10 Principaux pays producteurs de canne à sucre en 2005 75
- 11 Consommation de sucre *per capita* en divers pays 110
- 12 Capacité des systèmes de cogénération à installer dans les usines de sucre et de bioéthanol dans l'État de São Paulo au cours des prochaines années 116
- 13 Valeur de la bagasse utilisée pour la production d'électricité 117
- 14 Valeur de la bagasse utilisée pour la production d'éthanol 117
- 15 Utilisation de l'énergie (a) et émissions de GEE (b) pour la production de plastiques 149
- 16 Évolution de la production de canne à sucre, d'éthanol et de sucre au Brésil 165
- 17 Teneur moyenne d'éthanol anhydre dans l'essence brésilienne 166
- 18 Evolution de la production de véhicules à l'éthanol anhydre et de leur participation dans les ventes de véhicules neufs 166
- 19 Sources primaires d'énergie utilisées au Brésil en 2007 167
- 20 Distribution de la capacité annuelle de traitement des usines de sucre et d'éthanol au Brésil 169

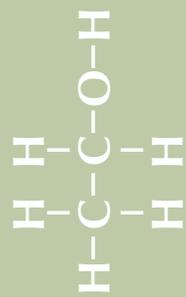
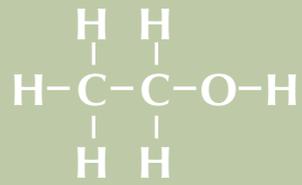
| | |
|---|-----|
| 21 Profils de production des usines de sucre et d'éthanol au Brésil dans la récolte 2006/2007 | 170 |
| 22 Évolution de la productivité agricole, industrielle et agro-industrielle des usines de sucre et d'éthanol au Brésil | 173 |
| 23 Evolution des prix payés aux producteurs d'éthanol au Brésil | 174 |
| 24 Consommation de fertilisants pour les principales cultures au Brésil | 197 |
| 25 Pertes de sol et d'eau de pluie dans certaines cultures au Brésil | 198 |
| 26 Déboisement annuel en Amazonie brésilienne | 202 |
| 27 Utilisation de la terre dans les propriétés rurales au Brésil | 204 |
| 28 Evolution de la superficie utilisée par les principales cultures au Brésil | 205 |
| 29 Utilisation des terres au Brésil | 205 |
| 30 Evolution des prix payés au producteur, sans taxes, d'essence aux EUA et de bioéthanol de canne à sucre au Brésil | 212 |
| 31 Structure des prix de l'essence normale, du bioéthanol hydraté et de l'huile diesel à Rio de Janeiro en mars 2008 | 213 |
| 32 Evolution des prix moyens au consommateur du bioéthanol hydraté et de l'essence normale et du rapport entre ces prix au Brésil | 214 |
| 33 Structure des coûts de production de la canne à sucre dans le Centre-Sud en 2005 | 216 |
| 34 Structure du coût d'opération et de manutention d'une distillerie autonome pour la production de bioéthanol de canne à sucre au Centre-Sud en 2005 | 216 |
| 35 Productivité moyenne des travailleurs de l'agro-industrie de la canne à sucre au Brésil | 219 |
| 36 Potentiel bioénergétique par type de biomasse | 235 |
| 37 Production d'éthanol en 2007 par régions | 244 |
| 38 Fraction de la demande de bioéthanol pour ajouter 10% à l'essence passible d'être produite au moyen de la conversion du miel résiduel disponible dans la fabrication du sucre | 251 |
| 39 Fraction des superficies cultivées (totale et en canne) nécessaire pour produire le bioéthanol requis pour additionner 10% à l'essence, en supposant la conversion du jus direct | 252 |
| 40 Estimations d'offre et de demande en bioéthanol combustible pour 2010 et 2015 | 258 |
| 41 Indices de prix pour le pétrole brut et les produits agricoles (Moyenne 2000 = 100) | 273 |
| 42 Indices de prix pour le pétrole brut et les produits agricoles associés au bioéthanol et au biodiesel (Moyenne 2000 = 100) | 273 |
| 43 Indices de prix pour le pétrole brut et les produits agricoles associés au bioéthanol (Moyenne 2000 = 100) | 274 |

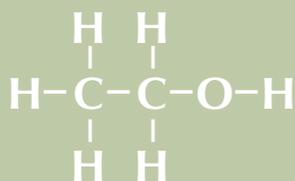
Tableaux

| | |
|---|----|
| 1 Paramètres de rendement végétal pour les cycles photosynthétiques | 31 |
| 2 Propriétés de l'essence et du bioéthanol | 41 |

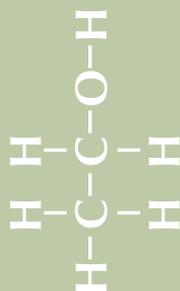
| | |
|---|-----|
| 3 Exigences d'altérations des véhicules en fonction de différentes teneurs en bioéthanol dans l'essence | 44 |
| 4 Effet du bioéthanol sur l'indice d'octane de l'essence-base | 45 |
| 5 Durabilité de matériaux plastiques en bioéthanol | 49 |
| 6 Tableau général des biocarburants | 71 |
| 7 Principaux paramètres agricoles de la canne | 78 |
| 9 Pertes et rendements moyens des usines de canne | 85 |
| 10 Demande de fertilisante et phytosanitaires pour la production de maïs aux EUA | 88 |
| 11 Rendements des coproduits dans la voie humide | 89 |
| 12 Bilan d'énergie dans la production de bioéthanol de canne (MJ/tc) | 97 |
| 13 Emissions dans la production du bioéthanol de canne (kg CO ₂ eq/m ³) | 98 |
| 14 Emissions nettes de la production et de l'utilisation du bioéthanol de canne (kg CO ₂ eq/m ³) | 98 |
| 15 Bilan d'énergie et émissions de GEE pour le bioéthanol de maïs aux EUA | 102 |
| 16 Comparaison des différentes matières premières pour la production de bioéthanol | 103 |
| 17 Principaux pays producteurs et exportateurs de sucre pour la campagne 2006/2007 | 107 |
| 18 Energie électrique et bagasse excédente dans des systèmes de cogénération dans l'agro-industrie de la canne à sucre | 115 |
| 19 Nouveaux produits de l'agro-industrie de la canne à sucre | 122 |
| 20 Processus pour le pré-traitement de la biomasse pour l'hydrolyse | 131 |
| 21 Comparaison des différentes options pour l'hydrolyse de la cellulose | 132 |
| 22 Comparaison des estimations de rendements et des coûts pour la production de bioéthanol au moyen de l'hydrolyse | 135 |
| 23 Comparaison des estimations de rendement et de coûts des systèmes BIG/GT-CC | 141 |
| 24 Comparaison des rendements et des coûts pour la production de combustibles de synthèse | 144 |
| 25 Processus de base de l'industrie alcool-chimique | 146 |
| 26 Impact de l'introduction de nouvelles technologies dans la production de bioéthanol | 180 |
| 27 Expectatives de gains d'efficacité dans les processus de la production de bioéthanol (En %) | 181 |
| 28 Bilan résumé des émissions de gaz carbonique dans l'agro-industrie du bioéthanol de canne à sucre dans le Centre-Sud brésilien (kg/mille litres de bioéthanol) | 188 |
| 29 Effluents liquides de l'agro-industrie du bioéthanol | 192 |
| 30 Utilisation de produits phytosanitaires agricoles dans les principales cultures au Brésil (En kg d'ingrédient actif par hectare) | 194 |
| 31 Potentiel pour la production de canne à sucre au Brésil | 208 |
| 32 Demande de superficies pour la production de bioéthanol visant le marché global en 2025 | 210 |

| | |
|--|-----|
| 33 Emplois directs formels par activité et région du secteur du sucre et de l'alcool | 218 |
| 34 Impacts directs, indirects et induits pour le traitement d'un million de tonnes de canne à sucre pour la production d'alcool | 224 |
| 35 Potentiel total technique de production de bioénergie pour diverses régions et scénarios de production en 2050 (EJ par an) | 236 |
| 37 Les biocarburants dans l'offre d'énergie totale primaire (En PJ) | 242 |
| 38 Participation relative des biocarburants dans l'offre totale primaire d'énergie (En %) | 243 |
| 39 Capacité de production et de consommation de bioéthanol dans l'Union Européenne (En millions de litres/an) | 248 |
| 40 Principaux objectifs pour le développement de la bioénergie | 260 |
| 41 Principaux instruments de politique énergétique en rapport avec la bioénergie | 262 |
| 42 Coefficients de corrélation simple entre les prix du pétrole et les prix des produits associés directement aux biocarburants, entre janvier 1990 et mars 2008 | 275 |





Préface



Le pétrole, le gaz naturel et leurs dérivés représentent 55% de la consommation mondiale d'énergie. Ce sont ces combustibles qui permettent l'existence des moyens de transport rapides et efficaces dont nous disposons aujourd'hui, ainsi que celle d'une bonne partie des activités industrielles. Hélas, ils ne vont pas durer plus de quelques décennies : en tant que combustibles fossiles, leurs réserves sont limitées, et la sécurité de l'approvisionnement est problématique pour les nombreux pays qui les importent, et leur utilisation est la principale source des gaz qui provoquent les changements climatiques et le réchauffement global.

Il est donc nécessaire de trouver des substituts à ces combustibles. Rien de plus rationnel que de les produire à base de matière organique renouvelable (biomasse), à partir de laquelle, dans un passé lointain, les combustibles fossiles furent produits par la nature. Une des options est l'éthanol, un excellent substitut à l'essence, le principal combustible utilisé dans les automobiles dans le monde.

Au Brésil, l'éthanol, produit à base de canne à sucre, remplace déjà actuellement la moitié de l'essence qui serait utilisée s'il n'existait pas, et son coût est compétitif, sans les subsides qui ont rendu viable le programme à ses débuts. Ceci fut obtenu en l'espace de 30 ans environ, à partir de la création du Pro-alcool, programme qui fut lancé dans le pays vers le milieu de la décennie de 1970 en vue de réduire la dépendance envers l'importation de pétrole. Les considérations économiques de l'industrie du sucre ont pesé également dans l'établissement du programme, mais les préoccupations de nature environnementale et sociale n'ont pas joué un rôle significatif à cette occasion.

Aux États-Unis, grand producteur mondial d'éthanol à base de maïs, le programme est plus récent et ses justifications sont l'élimination d'additifs dans l'essence et la réduction des émissions de gaz provoquant le réchauffement global.

Dans les pays d'Europe Occidentale, l'éthanol produit à partir du blé et de la betterave est utilisé également. Dans ces pays, le coût de l'éthanol est de deux à quatre fois plus élevé qu'au Brésil, et les subsides internes et les barrières douanières protègent les industries locales, empêchant l'importation de l'éthanol du Brésil.

Ceci a suscité des résistances de la part de certains groupes, qui associent l'éthanol (et le biodiesel, produit en moindres quantités) à un faux dilemme, celui de la production d'aliments vs combustibles. Cet argument ne tient pas lorsque nous nous rendons compte que la production d'éthanol dans le monde, d'environ 50 milliards de litres par an, occupe 15 millions d'hectares de terres, ou soit, 1% de la superficie utilisée par l'agriculture dans le monde, qui représente 1,5 milliard d'hectares.

Ces groupes allèguent également qu'en réalité, l'utilisation de l'éthanol ne réduit pas les émissions de gaz à effet de serre, ce qui est totalement incorrect en ce qui concerne l'éthanol de canne à sucre. De fait, celui-ci est pratiquement renouvelable, puisque la bagasse de la canne fournit toute l'énergie nécessaire à la phase industrielle de la production de l'éthanol. La situation des États-Unis est moins confortable, car la production de l'éthanol exige l'utilisation d'une énergie qui provient presque entièrement du charbon. L'on peut dire que l'éthanol de maïs est, en réalité, du charbon converti en éthanol, alors qu'au Brésil, il est presque entièrement le fruit de l'énergie solaire.

L'expansion de la culture de la canne à sucre et du maïs nécessite des changements dans l'utilisation du sol, ce qui peut entraîner l'émission de gaz à effet de serre lorsque l'expansion est le résultat d'un déboisement, ce qui n'est pas le cas du Brésil, où l'expansion se fait sur les pâturages. De toute manière, il s'agit ici d'un problème général de l'agriculture en expansion et non pas d'un problème imputable à la production de l'éthanol (ou du biodiesel). S'il existe ici un dilemme, il pourrait se dénommer : production d'aliments vs changements climatiques.

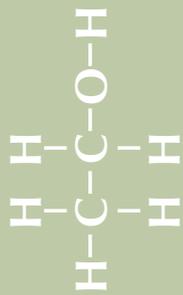
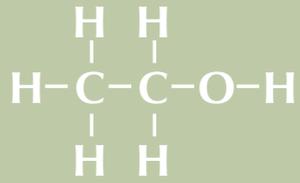
Ce que l'on peut appeler « solution brésilienne pour les problèmes des combustibles fossiles » – l'utilisation de l'éthanol de canne à sucre pour remplacer l'essence – n'est pas une exclusivité de notre pays, et elle est adoptée en d'autres pays producteurs de canne à sucre (il en existe presque cent au monde), comme la Colombie, le Vénézuéla, le Mozambique et les Îles Maurice.

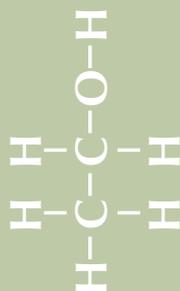
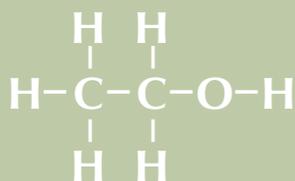
Ces questions, et d'autres encore, sont analysées à fond dans ce livre, qui décrit les caractéristiques biologiques de la canne à sucre en tant que plante, les techniques de production de l'alcool et de ses coproduits, comme la bioélectricité, en présentant « l'état de l'art » de ce que nous appelons les « technologies de première génération ».

Il y a également une discussion sur les « technologies de seconde génération » pour la production d'éthanol à base de la cellulose de n'importe quel autre produit agricole (y compris de la canne à sucre), ainsi que sur les technologies de gazéification de biomasse. La durabilité sociale et environnementale de la production de l'éthanol est discutée également.

La lecture de ce livre dissipera certainement plusieurs mythes qui se sont formés autour du grand et prometteur programme de l'éthanol au Brésil et de son expansion potentielle de par le monde.

Professeur José Goldemberg
Université de São Paulo





Présentation

*L'*intérêt mondial pour le développement des biocarburants, reflet de la volonté globale de développer les sources d'énergie renouvelables et propres pour surmonter la dépendance actuelle aux combustibles fossiles, a augmenté à partir du milieu de cette décennie. Dans ce contexte, le Brésil se distingue avec son programme de bioéthanol de canne à sucre, qui présente des résultats intéressants, notamment en ce qui concerne la recherche de variétés de canne de meilleur rendement ou encore la production de moteurs tournant avec n'importe quel mélange d'essence et d'éthanol.

La principale motivation ayant poussé le président Luiz Inácio Lula da Silva à commander à la Banque nationale de développement économique et sociale (BNDES) et au Centre de gestion et d'études stratégiques (CGEE) l'élaboration de ce livre, a été de partager cette expérience et les leçons en découlant, avec le reste du monde – en particulier avec les pays en développement situés dans les zones tropicales et sub-tropicales. La collaboration de la Commission économique pour l'Amérique latine et les Caraïbes (Cepal) et du bureau régional de l'Organisation des Nations-Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour l'Amérique latine et les Caraïbes a été motivée par ce même intérêt.

Avec l'augmentation du prix des matières premières agricoles et des aliments ces dernières années, il y a eu un questionnement sur une éventuelle corrélation entre ce phénomène et la croissance de la demande de produits agricoles destinés à la production de biocarburants. Pour aborder cette problématique, il est crucial de faire la distinction entre les différents systèmes de production des biocarburants, en tenant compte de leurs aspects environnementaux et énergétiques, ainsi que des interactions possibles avec la production d'aliments. Il faut comprendre que les biocarburants sont assez différents entre eux en ce qui concerne les impacts et les bénéfices.

En effet, le biocarburant de canne à sucre a peu en commun avec le bioéthanol de blé ou de maïs. Ce livre, qui tient compte de ces aspects, met en évidence que, tant en termes énergétiques qu'en termes d'effets sur la sécurité alimentaire, la production de bioéthanol de canne est supérieure aux autres alternatives.

Composé de neuf chapitres, le livre cherche à couvrir l'ensemble de la problématique. L'étude a été coordonnée par la BNDES et par le CGEE, chargés de la production des chapitres 1 à 7 et du chapitre 9. La Cepal et la FAO ont supervisé la production du chapitre 8, et ont apporté une expertise importante pour tous les autres chapitres.

Le premier chapitre présente l'évolution de la problématique des bioénergies ainsi que leur importance dans le monde actuel. Le deuxième chapitre aborde le sujet de l'éthanol comme combustible pour véhicules, en traitant les questions liées aux propriétés et rendements, tout comme les aspects économiques et les exigences logistiques pour son utilisation. Le troisième chapitre décrit les différents processus de production du bioéthanol de végétaux contenant des sucres ou des amylacés. Il détaille les étapes du traitement de la canne à sucre et du maïs, ainsi que les bilans énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre. Les coproduits du bioéthanol dans le traitement de la canne à sucre, tels que le sucre et la bioélectricité, sont analysés dans le chapitre quatre. La question de l'innovation technologique, notamment en ce qui concerne l'hydrolyse des résidus et la gazéification, est traitée dans le chapitre cinq. L'ensemble des thèmes traités dans ces parties sont abordés sur un plan technique, avec d'éventuelles références à l'expérience brésilienne, et sont donc passibles d'être appliqués à d'autres contextes. Le chapitre six présente l'évolution, les indicateurs et les perspectives du programme brésilien de bioéthanol, ayant été mis en œuvre dès 1931 et renforcé à partir de 1975. Le chapitre suivant analyse la question de la durabilité environnementale, économique et sociale de la production de bioéthanol de canne à sucre à partir de l'expérience brésilienne. Des commentaires sont également faits sur la certification des biocarburants. Le chapitre huit, supervisé par la Cepal et la FAO, présente le potentiel global de production de biocarburants et fait un état des lieux des politiques de soutien adoptées. Il évalue ainsi les perspectives existantes pour la formation d'un marché global de bioéthanol et les implications qu'un tel marché aurait sur l'offre d'aliments. Finalement, le chapitre neuf, fait une synthèse des principaux points étudiés et donne quelques recommandations.

Ce livre a l'ambition de servir de base au débat sur le potentiel et les limites de la production d'éthanol de canne à sucre, en particulier dans les régions où cette culture est pratiquée. Il montre combien il est important de mettre en œuvre des politiques et des incitations qui pour assurer le développement d'un marché compétitif pour l'éthanol de canne à sucre. Toutefois, cela ne doit pas se faire au détriment de la sécurité alimentaire, des objectifs prioritaires de réduction de la pauvreté et de la faim, ni de l'exploitation durable des ressources naturelles.

Ainsi, il est important de constater que de nombreux pays, en particulier ceux situés dans les régions tropicales et sub-tropicales comme bonne partie de l'Amérique latine et des Caraïbes, remplissent les conditions adéquates pour l'expansion de la canne à sucre à des fins énergétiques en termes d'exigences de sol, d'eau, de rayonnement solaires et de disponibilité en terres. Des études récentes démontrent la possibilité d'exploiter de façon durable ces avantages comparatifs en faisant un bilan des coûts/bénéfices économiques, sociaux, environnementaux et stratégiques, ainsi qu'en analysant les impacts sur le changement d'affectation des terres, les modèles d'investissement, les émissions de gaz à effet de serre (GES), les échanges commerciaux et la sécurité alimentaire. Ces aspects ont été soulignés récemment dans divers forums internationaux. Il faut tirer profit de la très riche expérience brésilienne qui constitue, à n'en pas douter, un modèle important pour d'autres pays de la région, pouvant être reproduit à travers la mise en œuvre de politiques adéquates de coopération horizontale.

Pour tirer le meilleur de la production de bioéthanol de canne à sucre, il est important qu'il y ait une plus grande intégration et cohérence des politiques aux niveaux national et international, ainsi qu'une meilleure coordination entre les actions des secteurs public et privé. Ces mesures ne doivent pas toucher aux avantages comparatifs que de nombreux pays détiennent pour la production de ce biocarburant. Ainsi, comme il est mentionné dans ce livre, il est particulièrement important de : (a) développer des méthodologies communes pour l'analyse du cycle de vie des émissions de GES, en reconnaissant l'importance des émissions directes et indirectes associées au changement d'affectation des terres ; (b) adopter des modèles non-distorsifs, acceptés au niveau international, pour évaluer les implications possibles de la production de bioénergie sur l'environnement ; (c) établir des orientations pour l'évaluation des émissions de GES dans les pays développés et en développement, le respect de règles dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce (OMC) et la réduction des barrières commerciales ; et (d) renforcer les liens entre les politiques alimentaires et énergétiques, afin que, d'un côté, la sécurité alimentaire ne soit pas menacée et que, par ailleurs, les agriculteurs ne soient pas privés des gains potentiels qu'ils pourraient obtenir grâce à la production de biocarburants.

Les perspectives pour le bioéthanol sont chaque jour plus importantes. Quelques thèmes, encore en discussion, ne sont pas abordés dans ce livre, et devront être traités dans un avenir proche. C'est le cas par exemple de la globalisation du bioéthanol. En effet, la création d'un marché mondial de bioéthanol impliquerait, comme pour le pétrole, l'adoption d'un ensemble de mesures pour augmenter la sécurité de l'approvisionnement, la mise en place d'alliances, ainsi que le développement de marchés consommateurs, avec des règles claires concernant les mécanismes de formation des prix et la définition des normes de référence.

La question de la protection de la propriété intellectuelle du développement biotechnologique ou de l'amélioration des variétés de canne, tout comme les mesures visant à maintenir l'avantage compétitif actuel des producteurs de bioéthanol dans les pays en développement, sont deux autres thèmes importants n'ayant pas été abordés par ce livre.

Il est clair aujourd'hui que les politiques sur les biocarburants doivent suivre quatre principes fondamentaux :

a) l'accès au marché : réduire les distorsions dans les marchés des produits agricoles et des biocarburants, et à éviter l'introduction de nouvelles restrictions ;

b) durabilité environnementale : limiter l'impact environnemental de la production des biocarburants en promouvant le développement de biocarburants les plus efficaces d'un point de vue énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre ;

c) promotion du développement économique : valoriser la recherche, le développement et l'innovation pour améliorer l'efficacité, en valeur et en volume, de la production de matières premières ainsi que leur transformation en biocarburants ; et

d) protection des populations à bas revenu et amélioration de la sécurité alimentaire, atténuer les problèmes créés par le déficit d'aliments et par la dépendance à l'égard des importations de pétrole dans les pays plus pauvres, en particulier pour ceux les plus gravement touchés par le problème de la faim.

Les institutions ayant contribué à la réalisation de cette étude estiment que les programmes de production et d'utilisation de l'éthanol de canne à sucre, bien conçus et bien administrés, peuvent contribuer à renforcer les relations entre les pays et à promouvoir le développement durable.

*Luciano Coutinho
Président, BNDES*

*Lúcia Melo
Présidente, CGEE*

*Alicia Bárcena
Secrétaire exécutive, Cepal*

*José Graziano da Silva
Représentant régional de la FAO pour
l'Amérique Latine et les Caribes*

*Luz do sol
que a folha traga e traduz
em verde novo,
em folha, em graça,
em vida, em força, em luz...*
Luz do sol, Caetano Veloso¹

¹ Lumière du soleil / que la feuille avale et traduit / en vert nouveau / en feuille, en grâce / en vie, en force, en lumière...



Chapitre 1

Bioénergie et biocarburants

La conversion de l'énergie solaire en énergie chimique, qui se réalise dans les végétaux durant la photosynthèse, est un des phénomènes les plus fascinants de la nature. Dans la plante illuminée par le soleil, la fugace radiation solaire se transforme en produits stables, absolument essentiels pour la vie sur notre planète. Et, depuis le début de l'humanité, ce fut la symbiose avec le monde végétal qui lui garantit l'approvisionnement en aliments, en énergie et en matières premières d'utilisation ample, rendant possible, au long des millénaires, l'évolution des modèles de confort et de productivité économique. Après un bref interrègne pendant ces derniers siècles, au cours desquels l'énergie solaire fossilisée commença à être exploitée et utilisée avec voracité, sous forme de charbon, de pétrole et de gaz naturel, l'énergie photosynthétique revient peu à peu à l'avant de la scène. Capable d'atténuer les problèmes environnementaux préoccupants, l'énergie photosynthétique apporte une nouvelle dynamique au monde agro-industriel et offre une alternative effective à l'évolution nécessaire de la société industrielle moderne, vers un contexte énergétique plus durable et rationnel. Sans prétendre être la solution exclusive, la captation et le stockage de l'énergie solaire dans les végétaux peuvent jouer un rôle d'avant-garde dans l'avenir énergétique des nations. De fait, comme le disait Melvin Calvin – Prix Nobel de Chimie en 1961 pour ses découvertes sur la photosynthèse –, les feuilles sont de véritables « usines silencieuses ».

Ce chapitre initial est consacré aux concepts de base et à l'évolution de la bioénergie, en particulier pour les biocarburants, en considérant une vision à long terme. Postérieurement, nous aborderons de façon plus détaillée l'expansion et les perspectives actuelles du marché brésilien du bioéthanol et du marché mondial des biocarburants.



1.1 Fondements de la bioénergie

Dans son acception la plus rigoureuse, l'énergie est la capacité à provoquer des changements ; elle se présente sous de nombreuses formes, comme l'énergie thermique, l'énergie électrique et l'énergie chimique, représentant toujours un potentiel pouvant causer des transformations, qu'elles soient naturelles ou déterminées par l'homme. L'énergie chimique est la forme d'énergie fournie au moyen de réactions chimiques, et dans laquelle il se produit un changement de composition, en fonction duquel les réactifs se convertissent en produits, généralement avec libération de chaleur. Par exemple, l'énergie chimique se trouve disponible dans les aliments et dans les carburants, et est utilisée dans les processus vitaux des animaux et de l'homme, et pour mouvoir les véhicules, entre autres finalités.

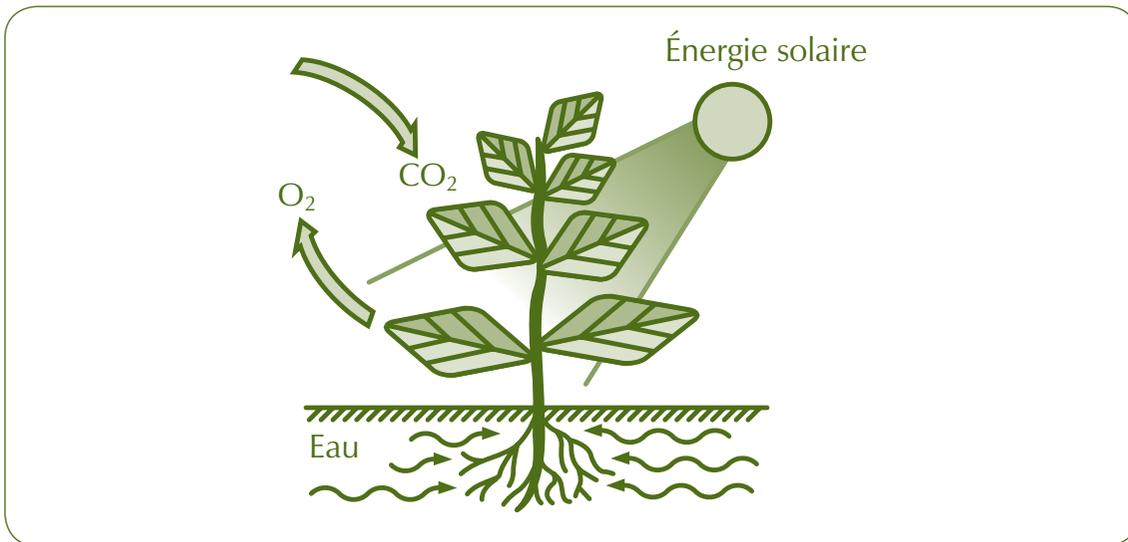
Un cas particulier d'énergie chimique est la *bioénergie*, qui peut être définie comme toute et quelconque forme d'énergie associée à des formes d'énergie chimique accumulée à l'aide de processus photosynthétiques récents. En général, on dénomme *biomasse* les ressources naturelles qui disposent de bioénergie et qui peuvent être traitées pour fournir des formes bioénergétiques plus élaborées et adaptées à l'utilisation finale. Nous pourrions donc citer comme exemples de sources de bioénergie le bois et les résidus de scieries, le charbon de bois, le biogaz résultant de la décomposition anaérobique de déchets organiques et d'autres résidus de l'agriculture et de l'élevage, ainsi que les *biocarburants liquides*, comme le bioéthanol et le biodiesel, et la *bioélectricité*, produite par combustion de biomasses telles que la bagasse et le bois.

Dans l'ample contexte de la bioénergie, la production de biocarburants liquides a été prise en considération pour répondre en particulier aux nécessités des véhicules de transport. À cette fin, outre les biocarburants, il n'existe pas encore, actuellement, d'autres alternatives énergétiques renouvelables, d'une maturité technologique et d'une viabilité économique suffisantes. Les biocarburants liquides peuvent être utilisés de manière assez efficace dans les moteurs à combustion interne qui équipent les véhicules automobiles les plus divers et qui se classent basiquement en deux types, selon la manière dont se déclenche la combustion : les moteurs du cycle Otto, avec allumage par étincelle, pour lesquels le biocarburant le plus recommandé est le bioéthanol ; et les moteurs du cycle Diesel, dans lesquels l'allumage s'obtient par compression, et qui peuvent utiliser le biodiesel, avec un bon rendement. Dans ces deux situations, les biocarburants peuvent être utilisés purs ou mélangés avec des carburants conventionnels dérivés du pétrole. Il est intéressant d'observer que, lors des premières années de l'industrie automobile, durant la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, les biocarburants représentaient la source d'énergie préférentielle pour les moteurs à combustion interne, avec l'adoption du bioéthanol, par Henry Ford, et de l'huile de cacahuète, par Rudolf Diesel. Ces deux produits furent remplacés, respectivement, par l'essence et par l'huile diesel, au fur et à mesure que les carburants dérivés du pétrole devinrent abondants et bon marché, à partir du début du siècle dernier. Les aspects techniques associés à l'utilisation de l'éthanol dans les moteurs seront commentés au prochain chapitre.



Automobile Ford Modèle A (1896) à l'éthanol pur.

Figure 1 – Le processus de la photosynthèse



La production de biomasse, comme résultat de la réaction de photosynthèse, dépend essentiellement de l'énergie solaire et de la présence d'eau et de dioxyde de carbone (CO₂). Elle se développe dans les cellules végétales des stomates des feuilles, selon des cycles complexes qui peuvent être représentés par la formule qui suit où l'eau et le gaz carbonique se combinent pour former une molécule de glucose, un sucre simple et de l'oxygène.



Dans cette réaction, en termes énergétiques, la formation de 1 kg de sucre correspond à la fixation de près de 17,6 MJ (mégajoules) d'énergie solaire, ce qui correspond à près d'un demi-litre d'essence. Du bilan de masse de cette réaction, on déduit que la synthèse de 1 kg de glucose consomme près de 0,6 kg d'eau et 1,4 kg de dioxyde de carbone, libérant dans l'atmosphère 1 kg d'oxygène. Naturellement, cette eau ne représente que la partie utilisée dans la composition du sucre, car durant sa croissance et, spécialement durant la photosynthèse, lorsque se produit l'évapotranspiration, le végétal a besoin d'eau en quantités représentant plusieurs centaines de fois la quantité fixée dans le produit végétal. Ainsi, la condition fondamentale pour la production de biomasse, et, par conséquent, de bioénergie, est la disponibilité de rayons solaires, d'eau et de dioxyde carbone.

Parmi ces facteurs de production de base pour la production végétale, le dioxyde de carbone est le moins problématique, car il se trouve bien distribué dans l'atmosphère, en concentrations suffisantes pour les plantes. Cependant, il est important d'observer que sa concentration a révélé, au cours des dernières décennies, une croissance préoccupante, associée principalement à l'usage intensif de carburants fossiles, capable de promouvoir une augmentation de l'effet de serre dans l'atmosphère terrestre, résultant en un réchauffement global. Dans ce sens, les biocarburants présentent deux avantages importants : leur utilisation permet de réduire l'émission de carbone dans l'atmosphère, et en outre, la production de biomasse est favorisée potentiellement, dans certaines limites et pour quelques espèces, par la disponibilité croissante de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

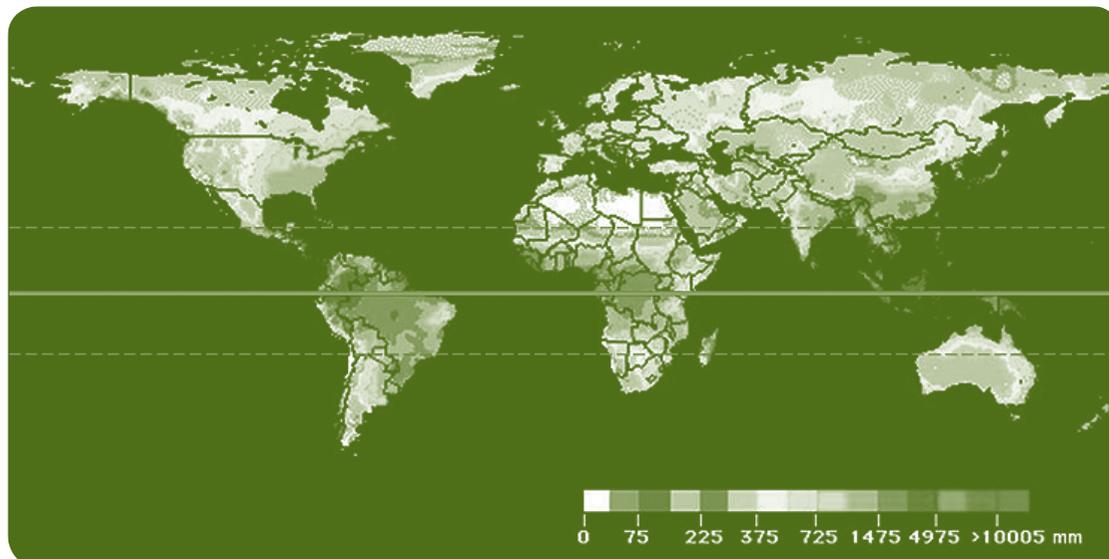
En ce qui concerne la radiation solaire, il est intéressant de connaître la fraction utilisée par les plantes, et la manière dont elle est disponible sur la planète. La photosynthèse se réalise en vertu de l'absorption de la lumière par la chlorophylle selon des bandes spécifiques du spectre solaire, spécialement pour les longueurs d'onde entre 400 et 700 nm (nanomètre), zone de la couleur rouge. En physiologie végétale, cette bande est appelée radiation photosynthétiquement active (PAR, de l'anglais *photosynthetically active radiation*) et correspond approximativement à 50% du total de la radiation solaire. Quant à la disponibilité de la radiation solaire, le facteur primordial est la latitude, ce qui fait que les régions tropicales reçoivent d'avantage d'énergie que celles situées sous des latitudes plus élevées. Selon l'Atlas Solarimétrique Brésilien, une aire d'un mètre carré, située entre 10° et 15° de latitude sud, dans la Région Nord du Brésil, reçoit en moyenne 18,0 MJ/jour, tandis que, pour une latitude entre 20° et 25°, dans la Région Sud, cette même aire reçoit 16,6 MJ/jour, soit près de 8% d'énergie en moins [Cresesb (2000)]. Associée également à la latitude, la température ambiante est un autre facteur qui influence directement la photosynthèse. Dans certaines

limites, des températures plus élevées favorisent la production bioénergétique, renforçant l'avantage des régions plus chaudes de la planète dans ce sens.

L'eau, le dernier des facteurs essentiels à la photosynthèse, constitue de fait le grand élément limitant à prendre en considération pour la production végétale. La disponibilité réduite de ressources hydriques d'une qualité adéquate et leur distribution hétérogène sur les continents représentent un des grands défis pour le développement de nombreuses nations. D'amples zones ensoleillées dans les régions semi-arides ne peuvent fournir qu'une faible contribution en biomasse si elles ne sont pas irriguées par des volumes d'eau significatifs, entraînant des coûts toujours très élevés et, fréquemment, des dépenses énergétiques qui rendent inviable la production bioénergétique. À l'échelle mondiale, l'irrigation consomme déjà actuellement plus de 70% des ressources hydriques disponibles et est responsable de 40% de la production agricole, faisant de l'accès à l'eau un thème d'une énorme priorité [FAO 2008a)]. En outre, les changements climatiques possibles découlant de l'augmentation de l'effet de serre sur notre planète tendent à altérer de façon préoccupante les régimes pluviaux et hydriques, augmentant les risques de phénomènes critiques, comme les sécheresses et les inondations qui, évidemment, affectent la production végétale de forme négative.

Quelques régions tropicales, spécialement en Amérique du Sud et en Afrique, (voir Figure 2) offrent une disponibilité significative en eau pluviale. S'ajoutant à une incidence plus forte de l'énergie solaire et à des températures adéquates, c'est là un avantage notoire qui confère à ces régions des contextes plus favorables à la production de bioénergie, à proumouvoir, naturellement, en harmonie avec les forêts exubérantes et avec l'agriculture qui s'y trouvent.

Figure 2 – Moyenne annuelle de pluviosité

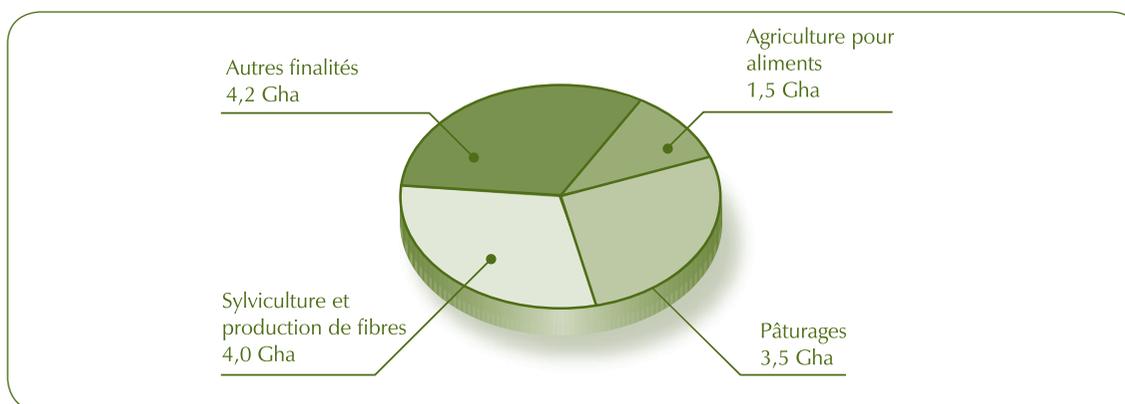


Source : FAO (1997).

Outre les facteurs de base (lumière, eau et dioxyde de carbone), les autres conditions importantes pour la production bioénergétique sont la fertilité du sol et la topographie. Les principaux éléments nutritifs minéraux nécessaires pour la croissance végétale sont l'azote, le phosphore et le potassium, mais la disponibilité d'autres minéraux, comme le bore, le manganèse et le soufre, en quantité moindre, est décisive également, ainsi que celle de matière organique. En outre, un sol fertile se caractérise par sa structure adéquate et sa porosité. De manière générale, les cultures bioénergétiques exigent l'emploi régulier de fertilisants chimiques pour atteindre des niveaux de productivité satisfaisants, dont le maintien dépend encore d'une gestion correcte des sols, spécialement de la mécanisation des opérations agricoles. Concernant la topographie, l'inclinaison des zones cultivées ne doit pas être très prononcée, en vue d'obtenir une occurrence réduite des processus d'érosion, principalement dans les cultures de cycle annuel, et aussi pour faciliter les opérations de culture et de récolte.

La prise en considération conjointe de tous ces facteurs délimite l'aire cultivable pour la bioénergie et pour toutes les autres utilisations. Si l'on considère toute la planète, cette aire a été estimée à 13,2 milliards d'hectares, desquels on utilise actuellement, pour la production d'aliments pour les êtres humains et pour les animaux, près de 1,5 milliard d'hectares, ce qui correspond à 11% du total [Hoogwijk et al. (2003)]. Anticipant un thème qui sera analysé plus en détail au Chapitre 8, le Graphique 1 montre comment sont distribuées les utilisations de la surface cultivable entre tous les continents, en signalant l'existence d'aires disponibles pour l'expansion des frontières agricoles et la production éventuelle de bioénergie, en particulier dans les régions encore peu explorées ou utilisées de forme extensive, comme les pâturages de basse productivité.

Graphique 1 – Utilisations de la surface cultivable sur la Terre



Source : Élaboration basée sur Hoogwijk et al. (2003).

Parmi les paramètres élémentaires dans les systèmes bioénergétiques, il est important de connaître l'efficacité des cultures dans leurs processus de captation et de stockage d'énergie solaire. Si l'on détermine la quantité d'énergie solaire convertie réellement en bioénergie, de quelle manière que ce soit, et si l'on comprend comment se produisent les transforma-

tions et les pertes d'énergie, il devient possible, éventuellement, d'obtenir des conditions plus favorables au rendement des plantes en tant que collecteurs d'énergie. Ce n'est cependant, qu'au cours des dernières décennies qu'ont été élucidés les mécanismes biochimiques qui permettent au végétal de synthétiser les sucres et les autres produits chimiques, et que l'on a établi ainsi les voies de fixation du carbone et identifié ses différentes phases, qui se développent selon une séquence complexe de réactions successives, avec diverses bifurcations et des composants instables, jusqu'à la formation de substances stables dénommées *cycles photosynthétiques*. Une telle connaissance ouvre une nouvelle et importante frontière de possibilités pour comprendre le comportement des plantes et, éventuellement, augmenter la productivité des espèces dotées de potentiel bioénergétique.

Les cycles photosynthétiques d'intérêt majeur sont le cycle de Calvin, ou cycle en C3, et le cycle Hatch-Lack, ou cycle en C4, où la première molécule stable produite présente, respectivement, trois carbones (acide phosphoglycérique) ou quatre carbones (produits comme oxaloacétate, malate et aspartate) [Hall et Rao (1999)]. Tandis que la majorité des plantes connues utilise le cycle en C3, quelques graminées tropicales, comme la canne à sucre, l'orge et le sorgo, suivent le cycle en C4. Cette distinction est importante pour le développement de systèmes bioénergétiques, en fonction de la grande différence de productivité entre ces cycles en faveur du cycle en C4 qui offre un taux photosynthétique de saturation élevé (il absorbe d'avantage d'énergie solaire), une absence de pertes par photorespiration, une efficacité élevée dans l'utilisation de l'eau, une tolérance saline plus élevée et un bas point de compensation pour le CO₂ (c'est-à-dire qu'il répond mieux en présence de concentrations moindres de ce gaz). En résumé, on peut affirmer que les végétaux de cycle en C4 sont les plus aptes à la production bioénergétique. Le Tableau 1 présente une comparaison de quelques paramètres intéressants pour ces deux cycles photosynthétiques [Janssens et al. (2007)].

Il est estimé que, de toute la radiation solaire atteignant la Terre, soit 178 mille TW (térawatt ou milliard de kilowatts), environ 180 TW, ou 0,1%, sont utilisés dans les processus photosynthétiques, naturels ou promus par l'homme. De la sorte, sur toute la planète, sont produites chaque année près de 114 milliards de tonnes de biomasse, en matière sèche, correspondant à environ 1,97 milliards de TJ (térajoule ou milliard de kilojoules), équivalents à 314 billions de barils de pétrole, près de dix mille fois la consommation mondiale actuelle de ce combustible fossile. Dans ce contexte, l'efficacité moyenne d'assimilation d'énergie solaire est inférieure à 1%, bien que les végétaux les plus performants, comme la canne à sucre, puissent atteindre 2,5% en moyenne annuelle [Smil (1991)]. Naturellement, ces valeurs servent à peine comme référence pour la compréhension de la magnitude énergétique de la photosynthèse, et il serait insensé d'imaginer la bioénergie comme substitut de toutes les formes fossiles d'approvisionnement énergétique, principalement dans les pays où la demande est élevée. Cette croissance végétale se produit, comme on l'a vu, surtout en des formations natives de régions tropicales, et l'on estime que les activités agricoles correspondent à près de 6% de ce total.

Tableau 1 – Paramètres de rendement végétal pour les cycles photosynthétiques

| Caractéristique | Espèces en C3 | Espèces en C4 |
|--|---|---|
| Raison de transpiration (kg d'eau évaporée par kg synthétisé) | 350 – 1000 | 150 – 300 |
| Température optimale pour la photosynthèse (°C) | 15 à 25 | 25 à 35 |
| Lieu de la photosynthèse | Toute la feuille | Partie externe de la feuille |
| Réponse à la lumière | Saturée pour radiations moyennes | Non-saturée sous radiations élevées |
| Productivité annuelle moyenne (t/ha) | ~ 40 | 60 à 80 |
| Aptitude climatique | Tempéré à tropical | Tropical |
| Exemples | Riz, blé, soya, toutes les plantes fruitières, oleagineuses et la majorité des végétaux connus | Maïs, canne à sucre, sorgo et autres graminées tropicales |

Source : Janssens et al. (2007).

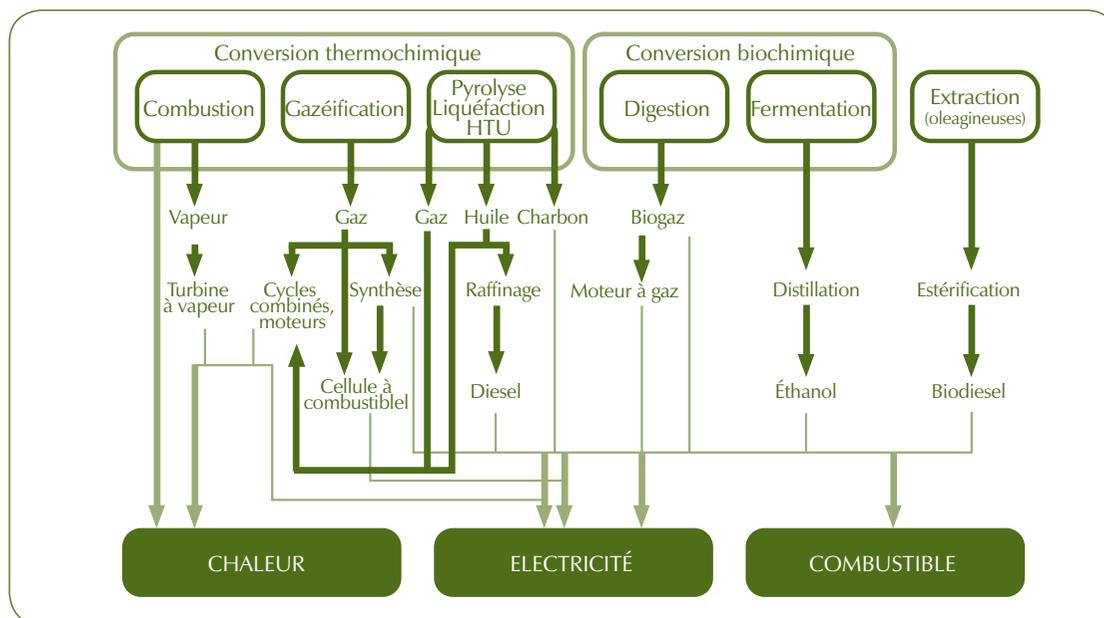
Il est intéressant d'observer que, selon le végétal, l'énergie solaire est fixée en différentes substances et organes d'accumulation, qui déterminent les voies technologiques pouvant être adoptées pour sa conversion en biocarburants comme utilisation finale. Chez la canne à sucre, par exemple, les réserves énergétiques, comme la saccharose, la cellulose et la lignine, se situent principalement dans les tiges et sont employées traditionnellement dans la production de bioéthanol et de bagasse, mais les pointes et les feuilles de la canne offrent aussi un intérêt croissant, au fur et à mesure que se développent des processus pour l'utilisation de leur substrat lignocellulosique. Par ailleurs, dans les arbres et autres espèces ligneuses, le contenu énergétique se trouve essentiellement dans le « bois » (tronc + branches), sous forme de cellulose et de lignine, et est employé surtout comme bois à brûler. Les racines et tubercules de plantes telles que le manioc et la betterave, accumulent de l'amidon et de la saccharose, tandis que les fruits et les semences, comme le palmier à huile et le maïs, accumulent généralement de l'amidon, du sucre et des huiles végétales, selon chacune des espèces.

Outre le fait qu'ils définissent les voies technologiques les plus adéquates pour la conversion de la biomasse en biocarburants, ces aspects sont importants pour l'efficacité globale de la captation et de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, pour la synthèse de carbohydrates (comme la cellulose et la saccharose), le végétal requière près de 60% d'énergie en moins que pour la synthèse de graisses ou de lipides [Demeyer et al. (1985)], par unité de masse

de produit final, ce qui, en principe, rend les voies associées au biodiesel, en comparaison, moins efficaces que celles du bioéthanol, à base de saccharose ou de cellulose.

La Figure 3 présente une synthèse des diverses voies de conversion pouvant être appliquées pour transformer la biomasse en biocarburants et en chaleur utile. Outre les processus physiques, purement mécaniques, pour la concentration, la réduction granulométrique, le compactage ou pour la réduction de l'humidité de la biomasse, deux groupes de technologies chimiques sont utilisés pour modifier la composition de la matière première et fournir des produits plus compatibles avec leurs utilisations finales : les *processus thermochimiques*, qui emploient des matières premières à faible teneur en eau et sous des températures élevées ; et les *processus biochimiques*, développés dans des milieux à teneur en eau élevée et sous des températures proches des conditions ambiantes.

Figure 3 – Routes technologiques pour la production de bioénergie



Source : Élaboration basée sur Turkemburg et al. (2000), apud Seabra (2008).

1.2 Évolution de la bioénergie et des biocarburants

La bioénergie, sous ses différentes formes, fut la principale et, dans certaines situations, l'unique forme d'approvisionnement énergétique exogène utilisée par l'homme tout au long de son histoire. Depuis les feux primitifs d'il y a plus de 500 mille ans, la biomasse ligneuse fut la source énergétique par excellence. Elle répondait aux besoins domestiques en énergie pour la cuisson et le chauffage, et fournissait également des systèmes d'illumination primitifs, qui utilisaient les graisses végétales et animales sur des chandeliers et des bougies.

Postérieurement et durant des millénaires, la production de céramiques et la métallurgie commencèrent à représenter une demande importante en bioénergie, consommée dans les fours et les forges. Ce n'est qu'au XVIII^{ème} siècle que se produisit l'épuisement des réserves de bois disponibles dans une bonne partie de l'Europe Occidentale et, principalement, en Angleterre, facteur déterminant pour le début de l'exploitation du charbon minéral et qui, avec la machine à vapeur, devint un des faits qui déclenchèrent la Révolution Industrielle. Si l'énergie fossile n'avait pas été introduite, sous forme de charbon minéral, disponible en quantité abondante et d'un accès relativement facile à l'époque, l'histoire moderne aurait connu un autre parcours.

Du Brésil colonial, nous avons un témoignage intéressant d'un processus agro-industriel important sur le plan économique, approvisionné par l'énergie de la biomasse. Selon un rapport de Antonil (1982), les usines à sucre de la région dénommée « Recôncavo Baiano », durant le XVII^{ème} siècle, possédaient

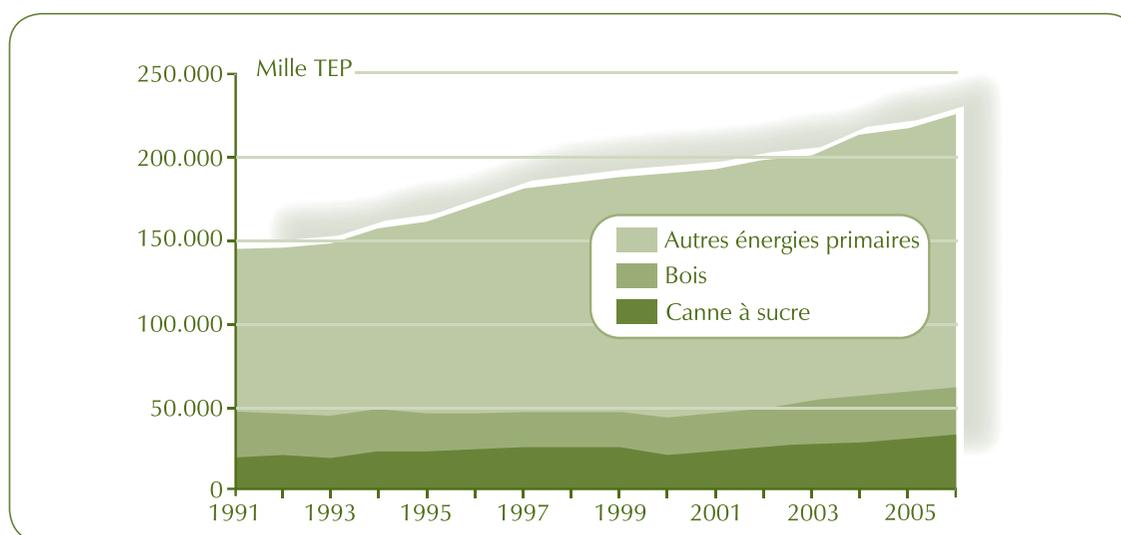
les fourneaux, qui brûlaient durant sept mois jour et nuit, consomment beaucoup de bois.. (car) l'aliment du feu est le bois, et le Brésil seulement, avec l'immensité des forêts qu'il possède, pouvait approvisionner avec abondance, comme il l'a fait durant tant d'années, et comme il le fera à l'avenir, autant de fourneaux, tellement sont nombreux ceux qui se comptent dans les usines de Bahia, Pernambuco et Rio de Janeiro...

Il est curieux d'imaginer ce que de telles usines faisaient, alors, de la bagasse des cannes traitées – si elles l'employaient pour l'alimentation des boeufs tractant les chariots, ou si elles la destinaient à d'autres fins –, car ce sous-produit aurait pu constituer la source d'énergie de base pour le processus de production, comme c'est le cas dans les usines à sucre et de bioéthanol actuelles, qui n'utilisent pas le bois et qui, de plus, produisent des excédents considérables d'énergie exportable sous forme de bagasse et d'électricité.

Comme en d'autres pays en développement situés en régions tropicales, l'ampleur des ressources bioénergétiques au Brésil aide à comprendre pourquoi ce fut seulement après 1915 que les combustibles fossiles commencèrent à être utilisés, en volume d'une certaine importance, dans ce pays où le bois demeura plus important que le pétrole pour l'approvisionnement énergétique jusqu'en 1964 [Dias Leite (2007)]. En effet, dans de nombreux chemins de fer brésiliens, qui représentaient pratiquement l'unique moyen de transport de marchandises sur des distances moyennes, et aussi dans les embarcations d'Amazonie et dans les « bateaux-cages » du Rio São Francisco, de même que pour la production d'énergie électrique en des lieux isolés à partir de locomobiles (ensembles de machines à vapeur simples et de chaudières de petite taille), le bois était le seul combustible employé jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle. Le Graphique 2 montre l'évolution de l'offre interne d'énergie au Brésil lors des dernières décennies, et la contribution de la bioénergie, en séparant les parts concernant la canne de celles concernant le bois. En 2007, ces sources de bioénergie correspondaient, respectivement, à 16,0% et 12,5% de la consommation totale d'énergie dans le pays [EPE (2008)].

Les données relatives à la bioénergie et, en particulier, à la part du bois dans les statistiques énergétiques sont, pour la majorité des secteurs, déterminées de manière indirecte, sur base d'indicateurs tels que la production de l'industrie du papier et de la cellulose et le nombre de fourneaux à bois. Récemment, l'Entreprise de Recherche Énergétique (EPE) a commencé à revoir cette méthodologie, en vue d'améliorer la consistance de ces informations dans le cas du Brésil. De toute manière, les relevés de l'Institut Brésilien de Géographie et Statistique (IBGE) ont démontré que le bois demeure un combustible important au niveau domestique. Sur un total de plus de 50 millions de résidences brésiliennes, près de 3,5% cuisinent uniquement à l'aide de biomasse, et plus de 14% font un usage simultané de bois et de gaz de pétrole liquéfié [IBGE (2004)]. Dans l'agro-industrie (produits laitiers, viandes, confiserie), en général et dans l'industrie céramique, spécialement dans les petites et moyennes entreprises, la principale source d'énergie est le bois, provenant en proportion croissante de la sylviculture, et selon une filière énergétique qui accroît la valeur économique générée en milieu rural.

Graphique 2 – Part de la bioénergie dans l'offre interne d'énergie au Brésil



Source : EPE (2007).

Il est estimé que les forêts plantées à des fins économiques au Brésil recouvrent 4,1 millions d'hectares, dont près de la moitié est destinée à des fins énergétiques, principalement pour la production de charbon végétal [FAO (2006)]. Cette surface reboisée connaît une expansion annuelle de près de 250 mille hectares, et offre des productivités énergétiques intéressantes, associées à un développement significatif des technologies en sylviculture. Bien qu'une part importante de la production de charbon végétal, située principalement en Amazonie occidentale, et une partie de la demande industrielle dans l'intérieur du nord-est, soit encore basée sur le déboisement et sur l'exploitation prédatrice de formations natives, d'une manière générale, l'utilisation du bois au Brésil présente de bons indicateurs de durabilité, sous ses divers aspects [FAO (2007a)].

En termes globaux, et en mettant à jour les données de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la demande d'énergie commerciale (c'est-à-dire celle qui est passée par les marchés énergétiques), en 2007, fut de l'ordre de 470 millions de GJ, ce qui correspond à près de 82 milliards de barils de pétrole durant une année [Best et al. (2008)]. De cette consommation totale, environ 88% ont été obtenus à partir de ressources fossiles, spécialement le charbon minéral et le pétrole. Le restant a été obtenu au moyen de la bioénergie, d'énergie hydro-électrique, d'énergie nucléaire et, en degré moindre, d'autres sources, comme l'énergie géothermique et l'énergie éolienne, avec une mention spéciale pour la bioénergie, la plus importante parmi les énergies renouvelables. L'utilisation de la bioénergie, dont l'apport annuel (commercial et non-commercial) est estimé à 45 millions de GJ [Best et al. (2008)], peut être constatée dans les fourneaux à bois d'une grande partie des habitations du monde entier, dans les fours et les fourneaux des chaudières de nombreuses agro-industries et dans les réservoirs de carburant d'un nombre croissant de véhicules, surtout dans les pays industrialisés.

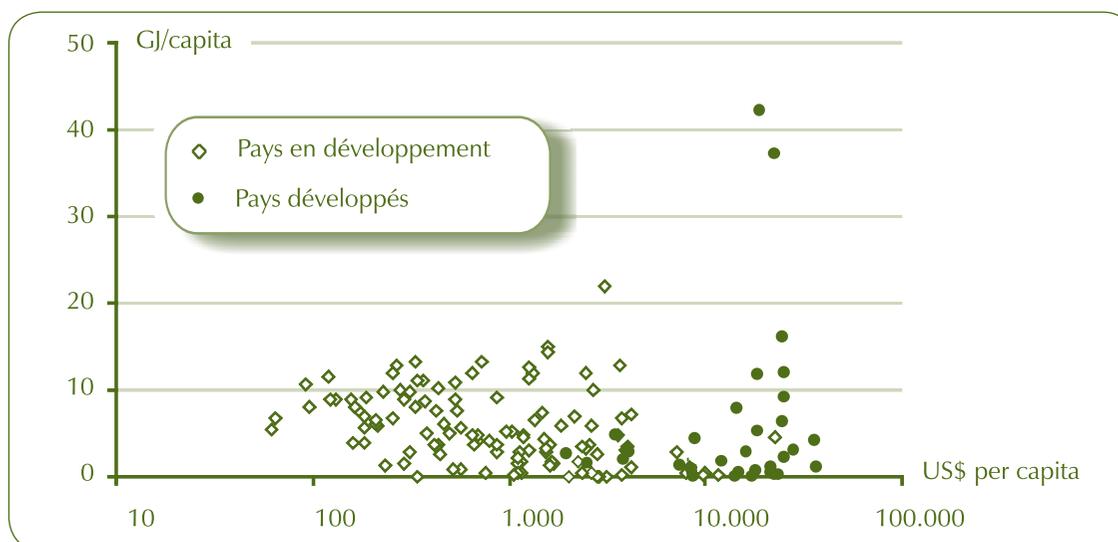
De cette manière, les systèmes bioénergétiques présentent une dichotomie marquante entre deux grands paradigmes différenciés. Dans le premier cas, se trouvent les systèmes traditionnels, pratiqués depuis des milliers d'années, dans lesquels l'exploitation des ressources de biomasse se fait sur une base minière, sans une mise en valeur économique adéquate des produits et, en général, au moyen de systèmes de basse efficacité et de productivité réduite, pour répondre aux besoins des habitations et des industries traditionnelles. Comme exemples de ce cas, citons l'utilisation de bois pour la cuisson domestique en milieu rural, pratique commune et sans impacts notables, et la production préjudiciable de charbon végétal associée au déboisement, pratique vouée à disparaître. Comme second paradigme, nous avons les systèmes innovateurs et modernes de bioénergie, où la production se fait presque toujours sur des bases commerciales, à l'aide de technologies efficaces, même du point de vue de l'environnement, en vue de répondre aux besoins en énergie dans l'industrie moderne, dans le secteur de transport et dans la production d'électricité. Pour ce cas, nous pouvons citer comme exemples les chaînes bioénergétiques du bioéthanol de la canne à sucre, du biodiesel de palme ou de suif, de la bioélectricité produite au moyen de bagasse, de goudrons végétaux ou de lixiviats celluloseux, entre autres.

Cette double réalité apparaît clairement dans le Graphique 3, qui met en rapport la consommation bioénergétique (essentiellement sur base de ressources ligneuses) *per capita* et le revenu *per capita* pour divers pays. Si nous considérons seulement les points clairs, correspondant aux pays en développement, où prédominent les formes traditionnelles de bioénergie, nous pouvons affirmer que la croissance du revenu conduit à une réduction de la demande bioénergétique ou, dit d'une autre manière, que l'utilisation de la bioénergie est une caractéristique des nations pauvres. Cependant, une telle hypothèse ne se confirme pas lorsque nous incluons dans l'analyse les pays industrialisés, correspondant aux points sombres, dans lesquels même pour des revenus élevés, la demande en bioénergie peut être importante, atteignant des niveaux supérieurs à ceux des autres pays.

Comme exemples notables de pays démontrant une consommation énergétique élevée et situés en des régions froides, de faible ensoleillement et, donc, d'une basse productivité pho-

tosynthétique, mais qui réussissent à produire de manière durable des volumes importants de bioénergie, la Suède et la Finlande obtiennent grâce à la photosynthèse, respectivement, 19% et 20% de leur demande énergétique totale [Hall e Scrase (2005)]. Comme autre exemple notable, les études des Départements de l'Énergie et de l'Agriculture des États-Unis annoncent pour 2030 une production annuelle de biomasse pour des fins énergétiques et industrielles, de l'ordre d'un milliard de tonnes (de matière sèche), capable de réduire de 30% la demande prévue de pétrole [DOE/USDA (2005)]. Dans ces cas, comme dans la production moderne de biocarburants, la bioénergie est conçue selon des technologies modernes de production et de transformation, est conforme aux exigences préalables de durabilité et est reconnue comme une forme renouvelable de fourniture d'énergie [FAO (2001)].

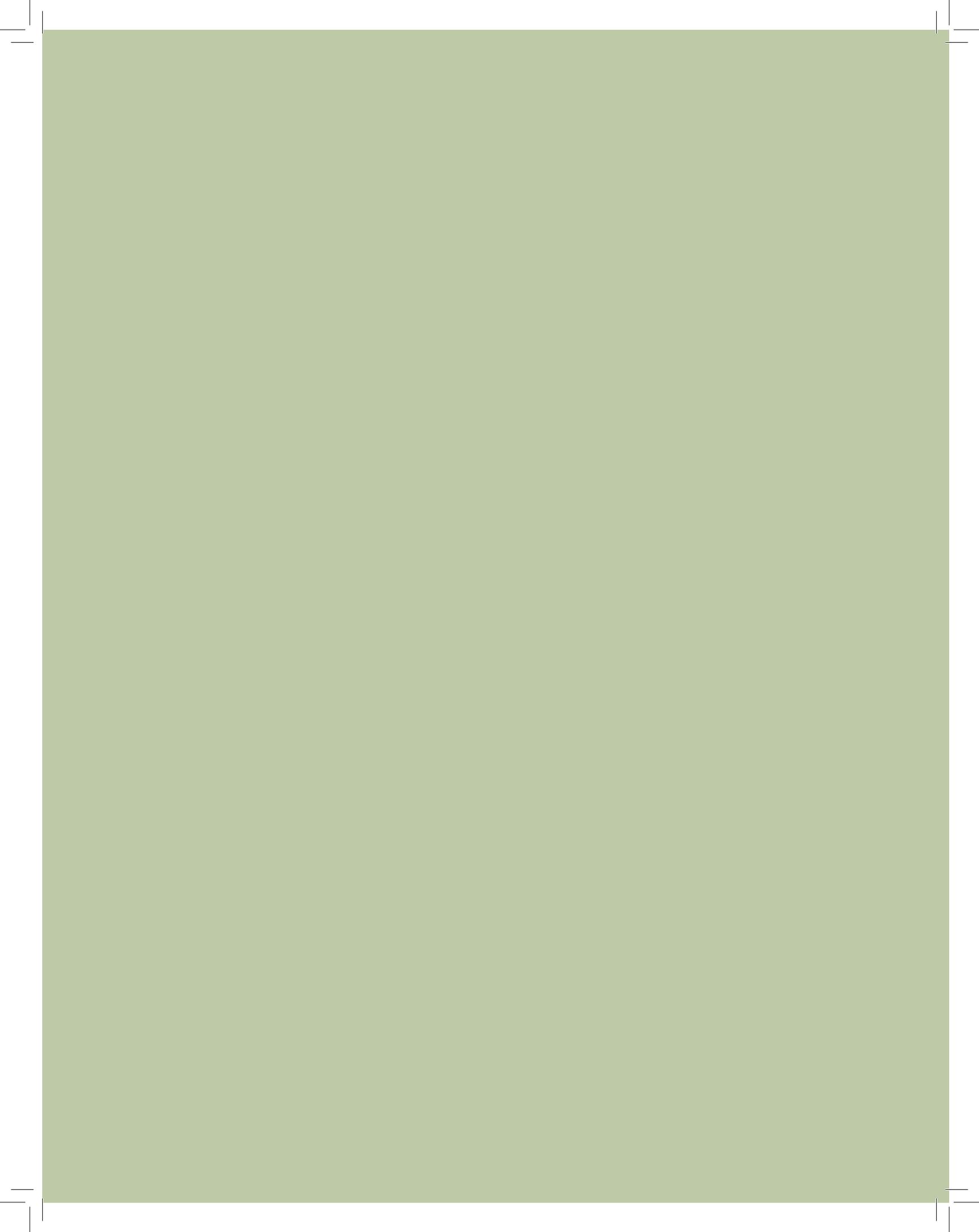
Graphique 3 – Contribution de la bioénergie en fonction du revenu per capita



Source : FAO (1998).

Selon de telles acceptions, l'évolution de la bioénergie, à l'échelle mondiale, indique chaque fois d'avantage le chemin vers la réduction de la contribution des bioénergies traditionnelles, qui devront se limiter aux situations de moindre impact, tandis que les bioénergies modernes sont en expansion, occupant l'espace des sources énergétiques fossiles. De cette manière, la bioénergie, cesse progressivement d'être considérée comme une énergie « antique » et est reconnue désormais comme une forme énergétique moderne, compétitive et adéquate, capable de provoquer une nouvelle révolution technologique. Comme le prédit Sachs (2007) :

La bioénergie n'est qu'une partie d'un concept plus ample qui s'appelle le développement durable, un concept qui se base sur un trépied : biodiversité, biomasse et biotechnologie, et qui peut servir de levier à l'importance que la biomasse pourra acquérir au cours des prochaines décennies.





Chapitre 2

L'éthanol comme carburant pour véhicules

Quelle que soit son origine – biomasse ou processus pétrochimiques et carbochimiques –, l'éthanol est un combustible, c'est-à-dire qu'il libère des quantités significatives de chaleur pendant sa combustion. Cependant, l'éthanol présente quelques différences importantes par rapport aux combustibles conventionnels dérivés du pétrole. La principale d'entre elles est la teneur élevée en oxygène, qui constitue près de 35% en masse de l'éthanol. Les caractéristiques de l'éthanol permettent d'obtenir une combustion plus propre et un meilleur rendement des moteurs, ce qui contribue à réduire les émissions polluantes, même quand il est mélangé à l'essence. Dans ce cas, il se comporte comme un véritable additif pour le combustible normal, améliorant ses propriétés. Cependant, malgré la longue expérience de l'utilisation de l'éthanol comme combustible dans quelques pays, en particulier au Brésil, il est vrai que subsistent, dans certains pays où l'éthanol n'est pas encore utilisé régulièrement, des préjugés et des manques d'information sur les conditions réelles d'utilisation et sur les avantages qui doivent être associés à ce combustible et additif.

Le présent chapitre se propose de présenter quelques aspects techniques, économiques et environnementaux importants pour l'éthanol en tant que combustible pour moteurs à combustion interne, que ce soit dans des mélanges avec l'essence (éthanol anhydre, c'est-à-dire, sans eau) ou pur (éthanol hydraté). Seront commentées ici les principales caractéristiques physiques et chimiques qui définissent sa spécification et en fonction desquelles sont revues son adaptation et sa compatibilité avec les élastomères et les métaux les plus utilisés dans les moteurs, en soulignant la vision de l'industrie automobile quant à son utilisation. Seront également analysées les émissions

atmosphériques associées à l'utilisation de l'éthanol, en comparaison avec celles de l'essence. Ceci est intéressant également dans les contextes où l'intention est d'adopter l'éthanol comme combustible. Seront abordés aussi la norme légale générique pour l'emploi de l'éthanol dans les véhicules, quelques particularités économiques, comme la formation de prix sur le marché des combustibles avec l'éthanol et les mécanismes fiscaux associés, et les aspects de la logistique du marché des combustibles, dans le cas de l'adoption de l'éthanol.

2.1 Les dimensions techniques et environnementales de l'utilisation de l'éthanol

L'éthanol, ou alcool éthylique, est une substance de formule moléculaire C_2H_6O , qui peut être utilisée comme combustible dans les moteurs à combustion interne à allumage par étincelle (cycle Otto) de deux manières : 1) dans les mélanges d'essence et d'éthanol anhydre ; ou 2) comme éthanol pur, généralement hydraté. Le Tableau 2 résume les principales caractéristiques de l'éthanol et d'une essence typique. Observons que ces propriétés ne se rapportent pas à une spécification formelle, qui inclue diverses autres propriétés et paramètres associés à la sécurité, au rendement, à la contamination et à l'agressivité chimique. Dans le cas brésilien, les spécifications, qui doivent être suivies par les producteurs et respectées par toute la chaîne de commercialisation, sont définies par le Décret ANP 309/2001, pour l'essence avec éthanol anhydre, et par le Résolution ANP 36/2005, pour l'éthanol anhydre et hydraté, dénommés, respectivement, alcool éthylique anhydre combustible (AEAC) et alcool éthylique hydraté combustible (AEHC), dans la législation brésilienne. Selon cette législation, si l'on considère les teneurs en masse, l'éthanol anhydre doit contenir moins de 0,6% d'eau, tandis que pour l'éthanol hydraté, cette teneur doit se situer entre 6,2% et 7,4%. Exprimées comme proportion en volume à 20° C, ces valeurs correspondent, respectivement, à une teneur maximum de 0,48% pour l'éthanol anhydre et à une fourchette de 4,02% à 4,87% pour l'éthanol hydraté.

Tableau 2 – Propriétés de l'essence et du bioéthanol

| Paramètre | Unité | Essence | Éthanol |
|---|-------------|-------------|-----------|
| Puissance calorifique inférieure | kJ/kg | 43.500 | 28.225 |
| | kJ/litre | 32.180 | 22.350 |
| Densité | kg/litre | 0,72 – 0,78 | 0,792 |
| Indice d'Octane RON (<i>Research Octane Number</i>) | - | 90 – 100 | 102 – 130 |
| Indice d'Octane MON (<i>Motor Octane Number</i>) | - | 80 – 92 | 89 – 96 |
| Chaleur latente de vaporisation | kJ/kg | 330 – 400 | 842 – 930 |
| Rapport air/combustible stoechiométrique | | 14,5 | 9,0 |
| Pression de vapeur | kPa | 40 – 65 | 15 – 17 |
| Température d'allumage | °C | 220 | 420 |
| Solubilité dans l'eau | % en volume | ~ 0 | 100 |

Source : API (1998) et Goldemberg et Macedo (1994).

Au Brésil, depuis plusieurs décennies, les seuls combustibles présents dans toutes les stations services pour moteurs à allumage par étincelle sont :

- Les essences « normale » et « premium », ayant un indice d'octane moyen (entre les méthodes RON et MON) minimum de 87 et 91, respectivement, et ayant dans les deux cas une teneur en éthanol anhydre de 20% à 25%, selon la décision du gouvernement fédéral ; ces essences sont employées dans les véhicules nationaux et importés à moteurs à essence, y compris les modèles de luxe.
- L'éthanol hydraté, ayant un indice d'octane moyen supérieur à 110, utilisé dans les véhicules aptes à son usage, qui peuvent utiliser des moteurs spécifiques à ce combustible ou des moteurs *flex-fuel* capables d'accepter n'importe quel mélange d'éthanol et d'essence (contenant elle-même 20 à 25% d'éthanol).

L'éthanol hydraté pur doit être utilisé dans des moteurs fabriqués ou adaptés spécifiquement à cette fin, en particulier avec l'adoption de taux de compression plus élevés, en vue d'utiliser de manière adéquate l'indice d'octane plus élevé de l'éthanol par rapport à celui de l'essence, et d'obtenir des gains d'efficacité de l'ordre de 10%. En d'autres mots, l'indice d'octane plus élevé de l'éthanol permet aux moteurs d'obtenir d'avantage d'énergie utile de la chaleur du combustible, en comparaison avec l'essence. D'autres modifications doivent être apportées au système d'alimentation de combustible et à l'allumage, pour tenir compte des différences dans le rapport air-combustible et de certaines autres propriétés. En outre, des modifications sont requises pour certains matériaux entrant en contact avec le combustible, comme par exemple un traitement anti-corrosif des surfaces métalliques des réservoirs, des filtres et des pompes à combustible et le remplacement de tubes ou l'adoption de matériaux plus compatibles avec l'éthanol. Actuellement, après des décennies de perfectionnement des moteurs fabriqués spécialement pour l'éthanol, la technologie automobile est suffisamment développée pour permettre aux véhicules à l'éthanol pur hydraté d'obtenir un rendement, une facilité de conduite, des conditions de démarrage à froid et une durabilité absolument similaires à ceux des moteurs à essence, spécialement dans les pays où l'hiver est modéré.

L'utilisation intense de l'électronique embarquée dans les systèmes avancés de contrôle de mélange et d'allumage, a permis, à partir de 2003, de lancer commercialement au Brésil des véhicules à moteurs « flexibles » (*flex-fuel*), capables d'utiliser, sans aucune interférence du conducteur, de l'essence (avec 20% à 25% d'éthanol), de l'éthanol hydraté pur, ou encore, des mélanges de ces deux combustibles dans n'importe quelle proportion, tout en conservant les exigences d'efficacité et de conduite et en respectant les limites légales d'émissions de gaz d'échappement [Joseph Jr. (2007)]. Les véhicules équipés de ces moteurs ont représenté la majeure partie des véhicules neufs vendus au Brésil à partir de 2005 et, depuis lors, ils se perfectionnent en matière de rendement et de fonctionnalité des systèmes de démarrage à froid. Il existe actuellement plus de 60 modèles différents, fabriqués par dix constructeurs, d'origine américaine, européenne et japonaise, installés dans le pays. On observe que cette

conception de véhicule « flexible », telle qu'adoptée au Brésil, permet à l'utilisateur de choisir, en fonction de sa convenance, le combustible qu'il va utiliser, depuis 100% d'éthanol hydraté jusqu'à de l'essence avec 20% à 25% d'éthanol. Aux États-Unis, au Canada et en Suède, sont commercialisés également des véhicules avec des moteurs « flexibles », mais selon un autre concept opérant dans une fourchette de teneurs en éthanol qui va de l'essence pure, sans éthanol, jusqu'à un mélange avec 85% d'éthanol anhydre et 15% d'essence, produit disponible dans un nombre croissant, mais encore limité, de stations-services, sous le sigle E85.

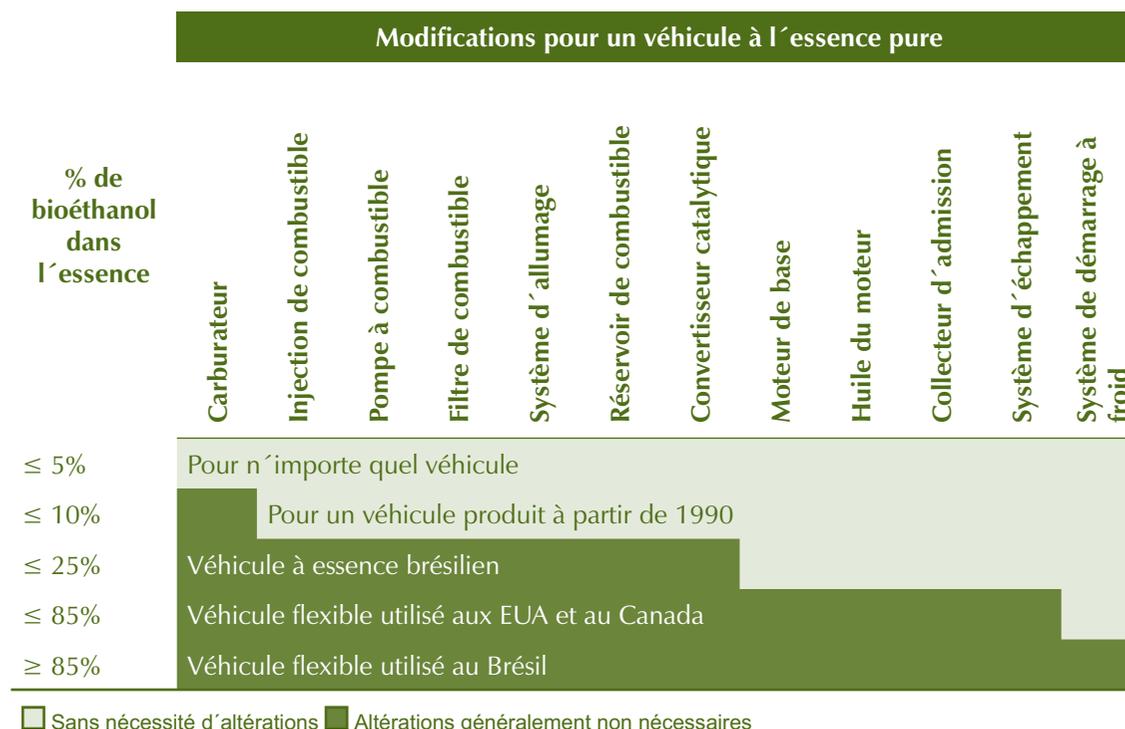
Cependant, la manière la plus simple, fréquente et immédiate d'utiliser l'éthanol comme combustible est l'utilisation en mélange avec de l'essence dans les véhicules déjà existants dans le pays, sans nécessité d'apporter des modifications aux moteurs. C'est là la situation du plus grand intérêt, aussi bien pour les pays en développement qui peuvent produire de l'éthanol et qui dépendent des importations de combustibles pour leur approvisionnement, à un coût de plus en plus élevé, que pour les pays industrialisés qui ont actuellement un potentiel limité de production interne d'éthanol, mais qui peuvent diversifier leur modèle de combustibles liquides, en ajoutant à la production locale l'éthanol importé de régions dotées de conditions favorables pour la production de ce biocarburant. Dans ce sens, il convient de vérifier les implications de l'adoption de mélanges d'éthanol et d'essence sur le rendement des moteurs, la facilité de conduite, la durabilité des véhicules et l'impact environnemental associé.

Au Brésil, depuis la décennie de 1980, la teneur en éthanol anhydre dans toute l'essence commercialisée dans les points de revente a été supérieure à 20%. Aux États-Unis, pays qui a commencé également à utiliser des mélanges éthanol-essence durant cette décennie, cette teneur fut limitée à 10%, connue également comme E10, et est considérée depuis lors par l'industrie automobile comme la proportion maximum pour l'adoption du mélange sans nécessité d'altérations de matériaux, de composants ou de recalibrages du moteur. Récemment, plusieurs pays, comme la Chine, la Thaïlande, l'Australie et la Colombie, ont adopté l'E10 comme point de départ pour l'introduction de l'utilisation de l'éthanol dans leurs marchés. Avec des teneurs de cet ordre, l'éthanol agit comme un additif améliorant la qualité de l'essence (*octane booster*) et un réducteur d'émissions polluantes, substituant le plomb tétraéthyle et d'autres additifs oxigénants qui présentent des contraintes environnementales, comme le MTBE, et voient leur usage banni en de nombreux pays. L'expérience de divers pays avec l'E10 permet d'affirmer que ce mélange peut être introduit pour approvisionner le parc de véhicules existant, sans altérations majeures.

Le Tableau 3 montre à quel point varient les exigences d'altérations dans les véhicules en fonction de la teneur en éthanol dans l'essence [Joseph Jr. (2005)]. Nous observons que les véhicules à essence utilisés au Brésil (fabriqués localement ou importés) sont préparés pour utiliser des teneurs moyennes en éthanol et ont déjà subi quelques modifications par rapport aux véhicules à essence pure. Dans le cas des moteurs « flexibles », on constate que la conception nord-américaine, qui utilise des mélanges contenant jusqu'à 85% d'éthanol

dans l'essence, est plus simple que la brésilienne, car le véhicule n'est pas équipé d'un système auxiliaire de démarrage à froid, mais elle ne permet pas aux moteurs de tourner à l'éthanol pur. Cependant, grâce au développement de systèmes d'injection plus avancés, dans un avenir proche, ces systèmes auxiliaires ne seront plus nécessaires, et la configuration adoptée au Brésil pourra être simplifiée.

Tableau 3 – Exigences d'altérations des véhicules en fonction de différentes teneurs en bioéthanol dans l'essence



Source : Élaboration propre ; adapté de Joseph Jr. (2005).

Quand l'éthanol est mélangé à l'essence, il en résulte un nouveau combustible ayant quelques caractéristiques distinctes de la valeur déterminée par la pondération directe des propriétés de chaque composant, à cause du comportement non-linéaire de certaines propriétés. Il convient de se rappeler que, tandis que l'éthanol est une substance chimique simple, l'essence est toujours un mélange avec plus de 200 différentes espèces d'hydrocarbures dérivés du pétrole. On commentera ci-après les principales propriétés des mélanges essence/éthanol et leur comportement vis à vis de l'environnement.

Indice d'octane

L'indice d'octane est la mesure de la résistance d'un combustible à l'auto-allumage et à la détonation, évaluée par les méthodes Motor (MON) et Research (RON), qui permet de déter-

miner le comportement d'un moteur alimenté avec ce combustible, respectivement, sous des conditions de charge élevée ou de charge constante. L'éthanol est reconnu comme un excellent additif antidétonant et il améliore, de manière sensible, l'indice d'octane de l'essence-base. C'est justement parce que toute son essence est additionnée d'éthanol que le Brésil fut l'un des premiers pays du monde à abolir totalement le plomb tétraéthyle, et qu'il n'a adopté le MTBE qu'occasionnellement et localement, durant les années 1990. Ces additifs antidétonants sont encore utilisés dans quelques pays, mais ils créent des problèmes environnementaux et cessent progressivement d'être utilisés. Comme nous pouvons l'observer en voyant les valeurs présentées au Tableau 4, l'addition d'éthanol affecte d'avantage l'indice d'octane RON que l'indice MON et l'augmentation de l'indice d'octane grâce à l'éthanol est fortement influencé par la composition de l'essence-base, c'est à dire de son propre indice d'octane. En règle générale, d'importance évidente, plus l'indice d'octane de l'essence-base est bas, plus le gain dû à l'éthanol est significatif.

Tableau 4 – Effet du bioéthanol sur l'indice d'octane de l'essence-base

| Composition de l'essence-base | | | Augmentation de l'indice d'octane avec : | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|---------|--|-----|-------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|------|
| | | | 5% de bioéthanol | | 10% de bioéthanol | | 15% de bioéthanol | | 20% de bioéthanol | |
| Aromatiques | Oléfiniques | Saturés | MON | RON | MON | RON | MON | RON | MON | RON |
| 50 | 15 | 35 | 0,1 | 0,7 | 0,3 | 1,4 | 0,5 | 2,2 | 0,6 | 2,9 |
| 25 | 25 | 50 | 0,4 | 1,0 | 0,9 | 2,1 | 1,3 | 3,1 | 1,8 | 4,1 |
| 15 | 12 | 73 | 1,8 | 2,3 | 3,5 | 4,4 | 5,1 | 6,6 | 6,6 | 8,6 |
| 11 | 7 | 82 | 2,4 | 2,8 | 4,6 | 5,5 | 6,8 | 8,1 | 8,8 | 10,6 |

Source : Carvalho (2003).

Volatilité

Pour qu'un combustible brûle correctement, il est nécessaire qu'il soit bien mélangé avec l'air. La facilité avec laquelle un combustible liquide se vaporise est donc une propriété importante qui affecte directement divers paramètres de rendement du véhicule, comme les conditions de démarrage à froid ou à chaud, l'accélération, la consommation en combustible et la dilution de l'huile lubrifiante. C'est exactement pour cela que les combustibles dérivés du pétrole doivent présenter une composition équilibrée entre leurs fractions légères et lourdes, de manière à produire une courbe de distillation, selon laquelle le produit commence à se vaporiser à des températures relativement plus basses et termine à des températures bien plus élevées que la température ambiante. L'addition d'éthanol tend à abaisser la courbe de distillation, spécialement dans sa première moitié, en affectant la température dénommée T50, correspondant à 50% de la masse évaporée, et bien que les températures initiale et finale de distillation en soient peu modifiées. En ce sens, l'addition d'éthanol a une faible influence sur le comportement des moteurs.

Cependant, une propriété importante et en rapport avec la volatilité – la pression de vapeur – est significativement affectée par l'addition d'éthanol. La pression de vapeur détermine le niveau des émissions de vapeur et la possibilité de formation de vapeur dans le système d'alimentation en combustible, un problème en partie résolu actuellement par l'adoption de pompes à combustible dans le réservoir, comme c'est le cas pour la grande majorité des véhicules modernes. Il est intéressant de constater que, bien que la pression de vapeur d'essence pure soit supérieure à celle de l'éthanol pur, comme le montre le Tableau 2, l'addition d'éthanol dans l'essence élève la pression de vapeur du mélange. Cette augmentation, typiquement, présente un maximum aux environs de 5% en volume d'éthanol dans l'essence, et se réduit lentement au fur et à mesure qu'augmente la teneur en éthanol. À titre d'illustration, nous pouvons citer l'exemple d'une composition donnée d'essence qui, recevant 5% d'éthanol, voit sa pression de vapeur s'élever à 7 kPa, tandis que, avec 10% en volume, cette pression n'est que de 6,5 kPa [Furey (1985)]. Cet effet peut être corrigé sans difficulté, en ajustant la composition de l'essence-base de manière à garantir que le mélange soit conforme aux spécifications. Au Brésil et en d'autres pays qui ont introduit l'éthanol dans l'essence, la pression de vapeur a été spécifiée à des niveaux similaires à ceux de l'essence pure. En résumé, l'effet de l'éthanol sur la pression de vapeur peut être contrôlé sans grandes difficultés.

Rendement

Les mélanges essence/éthanol pouvant être dosés de manière adéquate afin de respecter les spécifications typiques d'une essence pure, il n'existe pas nécessairement de problèmes de rendement et de conduite, pour autant que le mélange est conforme aux exigences de qualité spécifiées pour les combustibles. Cependant, en comparaison avec l'essence pure, une essence avec 10% d'éthanol a besoin de 16,5% de chaleur en plus pour se vaporiser totalement, ce qui peut constituer une difficulté réelle sous des températures très basses [TSB (1998)]. D'autre part, l'augmentation de chaleur de vaporisation de l'essence mélangée avec de l'éthanol est une des raisons principales pour lesquelles l'efficacité d'un moteur qui utilise ce combustible augmente de 1% à 2% par rapport au rendement de l'essence pure. Ainsi, même si une essence avec 10% d'éthanol contient 3,3% d'énergie en moins par unité de volume, l'effet final sur la consommation de combustible est de moindre ampleur et dépendra des conditions particulières d'utilisation [Orbital (2002)].

Ce point est important : pour des teneurs allant jusqu'à 10%, l'effet de l'addition d'éthanol sur la consommation des véhicules est inférieur à la variation de consommation observée entre deux conducteurs et, concrètement, un litre d'essence avec additif d'éthanol produit pratiquement les mêmes effets qu'un litre d'essence pure [Salih et Andrews (1992) et Brusstar et Bakenhus (2005)]. Pour des teneurs plus élevées, comme 25% d'éthanol, correspondant à un contenu énergétique en volume de 10% inférieur, il est observé une augmentation moyenne de la consommation de l'ordre de 3% à 5% par rapport à l'essence pure. Ces résultats, confirmés lors de nombreux essais de terrain, indiquent que l'éthanol, bien que présentant un pouvoir calorifique moindre, permet d'améliorer l'efficacité du moteur

grâce à une température plus basse à l'admission et au volume plus important des produits de combustion. Avec l'éthanol pur hydraté, et à condition que le moteur soit correctement adapté à ce combustible, cet effet est encore plus sensible grâce à l'augmentation du taux de compression : bien que présentant un pouvoir calorifique presque 40% inférieur à celui de l'essence, l'effet final sur les moteurs actuels est une consommation de 25% à 30% plus élevée que celle de l'essence.

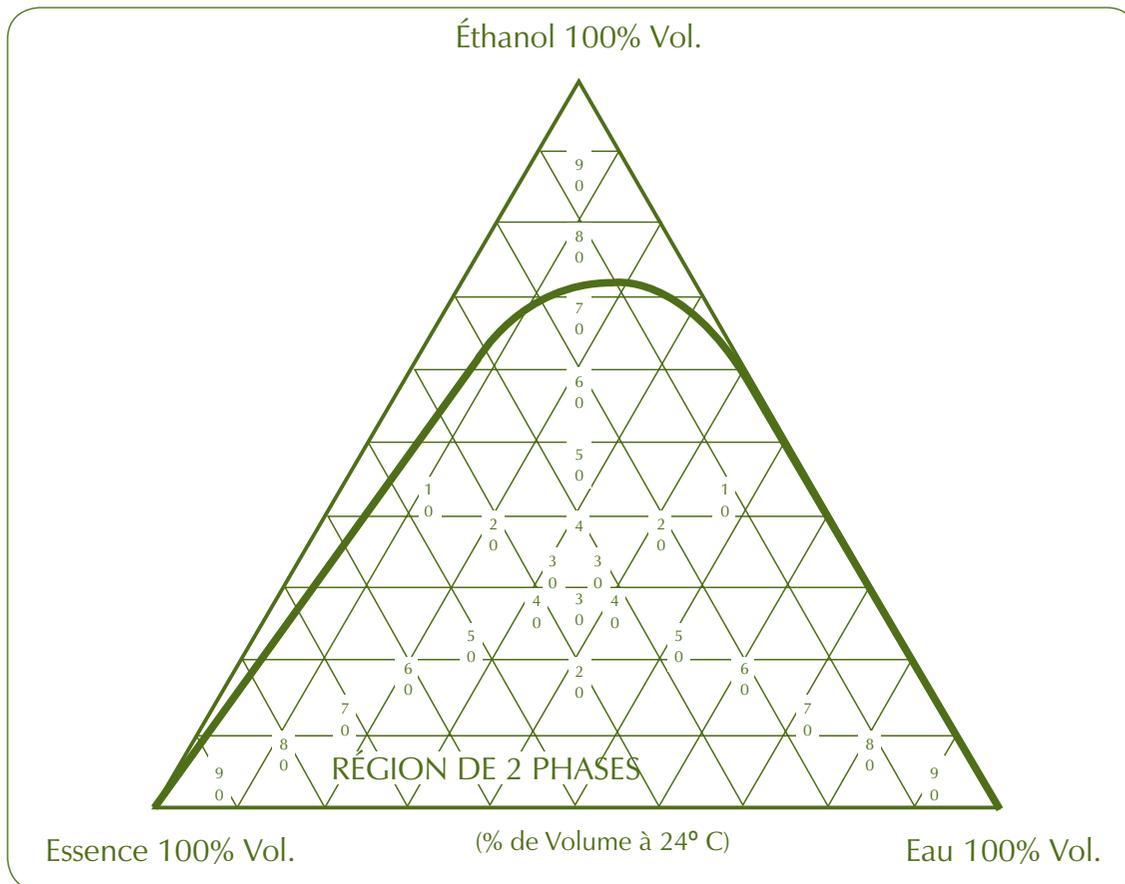
À moyen terme, l'adoption de technologies de motorisation de plus avancées, comme l'injection directe de combustible, des taux de compression plus élevés et des systèmes de turbo-alimentation intelligents, pourra permettre aux moteurs à éthanol hydraté de faire des gains significatifs de consommation, avec des résultats dépassant même ceux obtenus par les moteurs à essence pure [Szwarc (2008)].

Séparation de phases

La possibilité d'apparition d'une séparation de phases aqueuses dans un mélange éthanol/essence est souvent mentionnée comme un problème pour l'adoption de l'éthanol combustible. La crainte est que, d'une manière ou d'une autre, de l'eau, introduite avec l'éthanol ou provenant de condensation, reste séparée dans le fond du réservoir de combustible d'un véhicule, causant des problèmes pour le fonctionnement normal du moteur. En touterigueur, ce problème tend à diminuer au fur et à mesure qu'augmente l'addition d'éthanol dans l'essence. Tandis que l'essence pure n'absorbe pratiquement pas d'eau, l'éthanol anhydre a une affinité totale avec l'eau de sorte que les mélanges essence/éthanol présentent une capacité à dissoudre l'eau directement proportionnelle à la teneur en alcool, comme l'indique le diagramme ternaire présenté à la Figure 4. Plus la teneur d'éthanol dans l'essence est élevée, plus la bande qui définit la région où se produit une solubilité totale est large, comme observé dans la partie supérieure du diagramme. Sous des températures très basses, cet effet est moins prononcé, mais de toute manière, l'éthanol agit toujours comme un co-solvant entre l'essence et l'eau, réduisant ainsi les risques de séparation de la phase aqueuse de l'essence.

Le fait que le mélange d'essence et d'éthanol présente une solubilité raisonnable pour l'eau et que les températures ambiantes dans le pays sont peu rigoureuses expliquent que les véhicules « flex » fonctionnent sans problèmes au Brésil, où ils peuvent faire le plein avec n'importe quel mélange d'essence (avec 20% à 25% d'éthanol) et d'éthanol hydraté, dont l'eau ne se sépare pas grâce à l'alcool déjà contenu dans l'essence. Si l'essence brésilienne ne contenait pas une teneur élevée d'éthanol anhydre, son mélange avec l'éthanol hydraté conduirait probablement à une séparation de phases, spécialement sous des conditions de températures inférieures à 18°C. Il n'est donc pas logique d'imaginer que l'addition d'éthanol anhydre à l'essence puisse causer des problèmes de séparation de phases – en vérité, elle réduit ce risque.

Figure 4 – Solubilité de l'eau dans les mélanges essence/éthanol



Source : CTC (1998).

Compatibilité de matériaux

Certaines anciennes matières plastiques utilisées dans les colmatages, les tuyaux et les filtres, comme le caoutchouc naturel et le caoutchouc synthétique butylique, ont tendance à se dégrader plus rapidement en présence d'éthanol. Cependant, depuis 1980, ces matériaux ont été substitués par des élastomères fluorés, ce qui a résolu ce problème. Le Tableau 5 présente les résultats de tests de durabilité réalisés par l'armée britannique [Orbital (2003)], confirmant l'adaptation de l'éthanol à la majorité des plastiques utilisés actuellement. Toujours dans ce sens, une entreprise pétrolière communique les commentaires suivants à ses consommateurs :

Selon notre expérience, il n'existe aucun problème significatif de compatibilité entre l'essence et les oxigénés et les élastomères dans les automobiles plus anciennes. Il n'y eut pas d'augmentation des problèmes lorsque l'essence avec de

l'éthanol, ou du MTBE, fut introduite dans les zones métropolitaines en 1992, notamment dans les régions comportant des proportions plus importantes de voitures anciennes dans leur flotte [Chevron (2006)].

Tableau 5 – Durabilité de matériaux plastiques en bioéthanol

| Plastique | Durabilité |
|---------------------------------|------------|
| Polyéthylène conventionnel | Acceptable |
| Polypropylène | Acceptable |
| Polyméthylpentène (PMP) | Acceptable |
| Polycarbonate | Acceptable |
| Chlorure de vinyle (PVC) | Acceptable |
| Polyéthylène de haute densité | Excellent |
| Polytétrafluoréthylène (Teflon) | Excellent |

Source : Orbital (2003).

Quant aux métaux, sous des conditions normales d'utilisation, ces matériaux sont toujours sujets à la corrosion, et il est nécessaire d'avoir recours à une sélection adéquate et, éventuellement, à l'emploi de revêtements protecteurs. Les métaux considérés comme peu résistants à l'éthanol et à ses mélanges sont les alliages pour fonderie par pression (type Zamac) et quelques alliages d'aluminium [Owen et Coley (1995)]. L'agressivité de l'éthanol dépend de la teneur d'alcool dans l'essence et est associée particulièrement à la présence d'eau, d'acides organiques et de contaminants. Pour les mélanges d'essence avec 10% d'éthanol, l'usure de composants métalliques a été suffisamment étudiée et elle est considérée non significative en comparaison avec l'essence normale. Pour les teneurs plus élevées, il existe effectivement une crainte concernant les problèmes de compatibilité et de corrosion. Ceci explique pourquoi au cours des années 1970, quand l'essence brésilienne commença à incorporer de l'éthanol à des niveaux plus élevés, ont été introduites peu à peu diverses modifications dans les systèmes de combustible des véhicules. Les processus de recouvrement métallique et de protection, comme le nickelage et le chromage, sont d'usage commun dans les réservoirs de combustible des automobiles brésiliennes, et l'utilisation de matériaux plastiques dans ces composants est aussi croissante

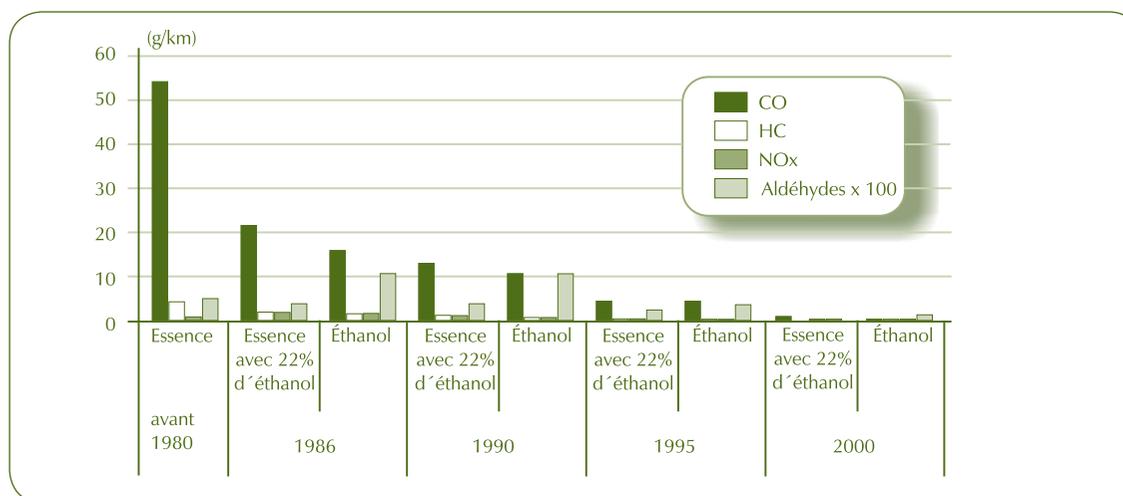
La manière la plus efficace de réduire les problèmes éventuels de compatibilité de matériaux avec l'éthanol d'établir de façon adéquate ses spécifications, en respectant des niveaux maxima d'acidité totale, de pH, de conductivité électrique, ainsi que des limites pour certains ions (chlorures, sulfates, fer, sodium et cuivre). Pour cette raison, la définition correcte et la stricte observance des spécifications de ce biocarburant sont essentiels au succès d'un programme d'éthanol combustible. Cela explique l'importance de l'initiative d'harmonisation des spécifications de l'éthanol combustible, qui est en train de se réaliser grâce à un effort conjoint du Brésil, de l'Union Européenne et des États-Unis, avec de bons résultats [Gazeta Mercantil (2008)].

Émissions de gaz d'échappement

En raison de sa composition et en comparaison avec les essences typiques, la combustion dans des moteurs d'essence mélangée à de l'éthanol et de l'éthanol pur produit moins d'émissions de monoxyde de carbone (CO), d'oxydes de soufre (SO_x), d'hydrocarbures et d'autres composés polluants. En même temps, les aldéhydes (composés du type R-CHO) s'élèvent ainsi que, selon les caractéristiques du moteur, les oxydes de nitrogène (NO_x). Les limites légales d'émission pour les véhicules sont normalement respectées intégralement, et les bénéfices résultant de l'utilisation de l'éthanol sont un fait bien connu.

Il est ainsi intéressant d'observer que la motivation de base pour l'addition d'éthanol à l'essence dans diverses régions des États-Unis, à partir des années 1990, fut exactement l'amélioration de la qualité de l'air associée à l'oxygénation provoquée par l'éthanol [Yacobucci e Womach (2002)]. Sachant que les modèles de voitures plus anciens sont plus polluants, plus le moteur est ancien (c'est-à-dire avec carburateur et sans catalyseur), plus le potentiel d'avantages environnementaux obtenus grâce à l'éthanol, par rapport à l'essence, est significatif. En outre, il est important de noter que l'éthanol endommage moins le catalyseur, comparé à l'essence, principalement par le fait de contenir moins de contaminants comme le soufre. Le graphique 4 montre comment la contamination due aux véhicules produits au Brésil s'est réduite au cours des dernières décennies, grâce au développement technologique des moteurs et à l'introduction de l'éthanol [Ibama (2006)]. Dans ce graphique, il faut noter que les colonnes pour les aldéhydes correspondent à des valeurs brutes (qui sont très faibles) multipliées par 100.

Graphique 4 – Évolution des émissions de véhicules neufs au Brésil



Source : Élaboré sur base de l'Ibama (2006).

Dans certaines études apparaît une préoccupation spéciale à l'égard des émissions d'aldéhydes associées à l'utilisation de l'éthanol. En effet, ces substances présentent un potentiel cancérogène et peuvent être observées en des teneurs plus élevées dans l'échappement des moteurs qui utilisent l'éthanol que dans celui des moteurs qui tournent à l'alcool pur. Cependant, les catalyseurs – équipements installés dans les véhicules nord-américains à partir de 1975 et qui commencèrent à être utilisés progressivement dans tous les véhicules commercialisés dans les autres régions du monde, et notamment au Brésil, à partir de 1997 – réduisent ces polluants à des niveaux acceptables, sans facteur aggravant. Actuellement, l'émission moyenne d'aldéhydes dans les véhicules neufs brésiliens est de 0,014 g/km pour les véhicules à l'éthanol et de 0,002 g/km pour les véhicules à essence (l'essence de référence pour les tests d'émission contient 2% d'éthanol anhydre), valeurs inférieures à la limite 0,030 g/km établie par la législation environnementale brésilienne, ainsi qu'à la limite de 0,020 g/km, qui entrera en vigueur en 2009 [Cetesb (2007)]. Diverses observations dans des villes américaines, comparant la qualité de l'air avant et après l'introduction plus massive de 10% d'éthanol dans l'essence, n'ont révélé aucune augmentation significative de la concentration d'aldéhydes dans l'atmosphère [Andersson et Victorinn (1996)]. Sachant que la principale source d'aldéhydes dans les contextes urbains provient des moteurs diesel [Abrantes et al. (2005)], il est possible de considérer comme concluante une importante étude réalisée en Australie, selon laquelle l'adoption de 10% d'éthanol dans l'essence a permis de réduire de 32% les émissions de CO, de 12% les émissions d'hydrocarbures et de plus de 27% les émissions d'aromatiques, réduisant ainsi de 24% le risque cancérogène [Apace (1998)].

Utilisation de l'éthanol dans les moteurs Diesel

Pour ce qui concerne l'utilisation de l'éthanol dans les camions et autobus, il est intéressant d'observer que les mêmes facteurs qui rendent l'éthanol spécialement apte à être utilisé dans les moteurs avec allumage par étincelle, le rendent peu attrayant pour les moteurs avec allumage par compression (cycle Diesel), généralement employés dans ces véhicules. Dans ce cas, il est nécessaire d'ajouter de nombreux additifs à l'éthanol de façon à réduire son indice d'octane, augmenter son indice de cétane et son pouvoir lubrifiant, et éventuellement d'utiliser des co-solvants, ce qui s'est révélé peu viable en termes économiques. Cependant, du fait de son effet favorable pour l'environnement, l'utilisation d'éthanol dans des moteurs diesel optimisés pour ce biocarburant est déjà une réalité, en particulier en Suède, où il y a plus de 18 ans, divers autobus en circulation régulière à Stockholm utilisent l'éthanol hydraté avec environ 5% d'additif dans les moteurs diesel [Ethanolbus (2008)]. Les résultats obtenus sur 600 bus circulant dans deux villes suédoises ont été incitatifs. Récemment, une troisième génération de moteurs commerciaux fonctionnant à l'éthanol a été lancée : Ils ont 9 litres de cylindrée, 270 CV de puissance et un taux élevé de compression (28 :1), en conformité avec les nouvelles normes européennes d'émissions des véhicules (Euro 5) [Scania (2007)]. Tout ceci explique le lancement du Projet BEST de promotion de l'utilisation de l'éthanol pour le transport collectif dans dix métropoles du monde entier, à une échelle expérimentale, (Bioethanol for Sustainable Transport) [BEST (2008)].

L'utilisation de l'éthanol dans les moteurs diesel a été promue, essentiellement, en raison de ses bénéfices environnementaux, car bien que l'efficacité thermique avec l'éthanol demeure similaire à celle du diesel (approximativement 44%), ces moteurs ne permettent pas d'utiliser l'avantage de leur indice d'octane plus élevé et présentent des consommations avec l'éthanol dépassant de 60% celles observées avec le diesel, à cause de la différence de pouvoirs calorifiques entre ces combustibles.



Autobus avec moteur cycle Diesel à l'éthanol hydraté, à Madrid [Sugre (2008)].

Au Brésil, dès les années 1980, plusieurs recherches ont été menées sur l'utilisation de l'éthanol dans des moteurs plus puissants, que ce soit par ajout d'éthanol dans les moteurs, ou encore, en « ottolisant » ces moteurs, c'est-à-dire en adaptant le système d'alimentation de combustible et en introduisant des systèmes d'allumage avec étincelle. Une vaste collection d'études a ainsi été accumulée, mais sans résultats concluants [Sopral (1983)]. Actuellement, il est compréhensible que le secteur du sucre et de l'alcool soit intéressé à développer cette utilisation pour le biocarburant qu'il produit. On estime qu'il existe à ce jour près de cent mille moteurs Diesel en opération au Brésil, dans les camions et les machines agricoles. Utiliser l'éthanol pour remplacer le diesel permettrait de réduire de moitié les dépenses de ce combustible dans le pays. Dans cette perspective, l'emploi de l'éthanol comme additif dans les moteurs à injection électronique et à taux de compression élevé semblent être la tendance prédominante [Idea (2008)].

La vision de l'industrie automobile et des usagers

En guise de dernière observation sur l'utilisation de l'éthanol comme additif à l'essence et ses implications sur le rendement et la durabilité des moteurs et des véhicules, il convient de mentionner la Worldwide Fuel Chart (WWFC). Cet ensemble de spécifications concernant les combustibles pour véhicules a été élaboré par des associations de constructeurs automobiles

L'éthanol dans les moteurs aéronautiques



Avion agricole Embraer Ipanema à l'éthanol hydraté.

L'utilisation d'éthanol hydraté comme combustible aéronautique est une réalité courante dans l'intérieur du Brésil. Ceci confirme l'afévation et le rendement de ce combustible dans d'autres types de moteurs. Depuis 2005, Embraer, entreprise aéronautique brésilienne, produit le modèle « Ipanema », un avion à usage agricole préparé spécialement et homologué régulièrement pour l'utilisation d'éthanol hydraté. Embraer fournit aussi des kits pour l'adaptation à l'éthanol des avions agricoles fonctionnant à essence, et développe actuellement des systèmes flex-fuel pour moteurs aéronautiques, visant le marché des avions agricoles et des avions de petite taille à moteur à piston, qui représentent une flotte actuelle au Brésil de près de 12 mille aéronefs [Scientific American Brasil (2006)]. L'utilisation de l'éthanol hydraté permet une économie opérationnelle significative, car elle réduit de plus de 40% le coût du km volé et augmente de 5% la puissance utile du moteur [Neiva Embraer (2008)], conduisant à l'apparition d'entreprises spécialisées dans la conversion et l'homologation d'avions de petite taille pour l'utilisation de ce biocarburant [Aeroálcool (2008)]. Aux États-Unis, des expériences d'avions fonctionnant à l'éthanol sont réalisées depuis 1980 : en 1989, la Federal Aeronautic Authority (FAA) a certifié pour la première fois un moteur aéronautique pour l'éthanol (Lycoming IO-540, injecté) ; les années suivantes, elle a certifié un autre moteur (Lycoming O-235, carburé) et deux modèles d'avions, le Cessna 152 et le Piper Pawnee (avion agricole), pour l'utilisation d'éthanol anhydre mélangé avec 5% d'essence (E95) [BIAS (2006)].

des États-Unis (Alliance of Automobile Manufacturers – Alliance), d'Europe (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles – ACEA) et du Japon (Japan Automobile Manufacturers Association, JAMA) et par l'association de fabricants de moteurs Engines Manufacturers Association (EMA). Elle représente donc bien la proposition que l'industrie automobile mondiale adresse aux producteurs de combustible [Autoalliance (2006)]. Selon cette proposition, la présence d'éthanol jusqu'à 10% est bien acceptée comme un oxygénant pour l'essence, avec la recommandation expresse qu'il doit s'agir d'un produit conforme aux spécifications de qualité.

Actuellement, tous les fabricants de véhicules, indépendamment du fait que l'éthanol soit ou non présent dans l'essence qui sera éventuellement employée, cherchent à produire des modèles adaptés à l'utilisation des nouveaux combustibles. Dans ce sens, les manuels du propriétaire des véhicules mentionnent les avantages de la présence de l'éthanol dans l'essence. Il est indiqué, par exemple, que « ce véhicule Toyota permet l'utilisation d'essence oxygénée avec 10% d'éthanol maximum. Ce combustible permet d'obtenir une excellente performance, réduit les émissions et améliore la qualité de l'air » [Toyota (2007)]. Bien que le WWFC limite sa recommandation à l'E10, quelques initiatives internationales en faveur de mélanges avec 20% d'éthanol anhydre (E20) sont en discussion. En Thaïlande et dans l'état nord-américain de Minnesota, par exemple, il est prévu d'adopter un mélange avec 20% d'éthanol. En réponse à ces tendances, certains modèles commercialisés en Thaïlande, comme la Ford Escape et la Ford Focus, sont déjà compatibles avec l'E20. Ford reconnaît que l'expérience accumulée sur le marché brésilien a permis de développer rapidement ces modèles pour le marché thaïlandais.

L'introduction plus généralisée de l'éthanol comme additif à l'essence rencontre encore de sérieux préjugés dans certains pays où cette technologie pourrait être mise en oeuvre immédiatement, et où elle pourrait représenter une alternative énergétique renouvelable et un composant important du développement local. Sans bases scientifiques, des craintes surgissent de la part des consommateurs quant à la durabilité et au rendement de leurs automobiles, créant ainsi une barrière culturelle qui doit être franchie en apportant une information claire et objective aux intéressés. L'utilisation de l'éthanol comme un bon additif et un bon combustible pour le consommateur et pour la société, est démontrée sans équivoque par les résultats de centaines d'études établissant sa pleine adéquation aux moteurs à combustion interne, mais aussi et surtout par la réalité de millions de véhicules circulant actuellement sans problème avec ce biocarburant, dans un éventail diversifié de pays, avec des flottes hétérogènes et d'âges variés, ce qui représente une introduction effective de l'utilisation de combustibles renouvelables sans grands inconvénients dans divers contextes.

2.2 Aspects économiques et institutionnels de l'éthanol combustible

Après avoir revu, dans les pages précédentes, les aspects techniques sur lesquels se base l'adoption de l'éthanol combustible, il est intéressant de voir comment, dans des conditions

de marché, se forment les prix des biocarburants, en particulier, du bioéthanol. Les marchés de combustible de la majorité des pays ont évolué au cours des dernières décennies vers des marchés aux prix libres, déterminés par les agents économiques, ou rivalisant avec les marchés plus compétitifs, selon les « prix de parité ». Dans ce contexte, les prix du bioéthanol au consommateur seront déterminés par les prix au producteur, qui à leur tour, devront être définis en fonction des chaînes de production et de logistique adoptées, incorporant les taxes perçues et les marges de commercialisations. Cette analyse est essentielle pour délimiter la viabilité effective du bioéthanol et les impacts de son adoption sur le marché consommateur.

Comme démontré dans le prochain chapitre, la production de bioéthanol peut être réalisée à l'aide de diverses matières premières, sachant qu'à chacune d'elles correspond un coût de production et une valeur de marché, qui équivaut au prix d'opportunité dans la formation des prix du bioéthanol. Ainsi, le prix minimum du bioéthanol aux producteurs doit satisfaire ces deux conditions préalables : a) couvrir les coûts de production, qui, naturellement, incluent les coûts d'obtention de la matière première et de fonctionnement de l'usine de transformation, ainsi que les coûts de capital correspondant aux investissements productifs réalisés ; et b) être égal ou supérieur aux résultats qui seraient obtenus si la matière première était destinée à la fabrication de produits alternatifs. Dans le cas du bioéthanol de canne à sucre, les produits alternatifs à prendre en considération sont, fondamentalement, le sucre et la mélasse, un sous-produit inévitable de l'industrie sucrière et pouvant être utilisé comme intrant industriel et aliment pour animaux.

Compte tenu des équations chimiques de la transformation du saccharose en bioéthanol, 1 kg de sucre permet, théoriquement, de produire 0,684 litre de bioéthanol anhydre. Avec des efficacités de fermentation et de distillation typiquement de 90% et 98%, respectivement, on obtient la formule ci dessous (explicitée dans le Graphique 5), qui permet d'estimer le prix d'indifférence du bioéthanol anhydre (PIEa) face aux prix du sucre (PAç) :

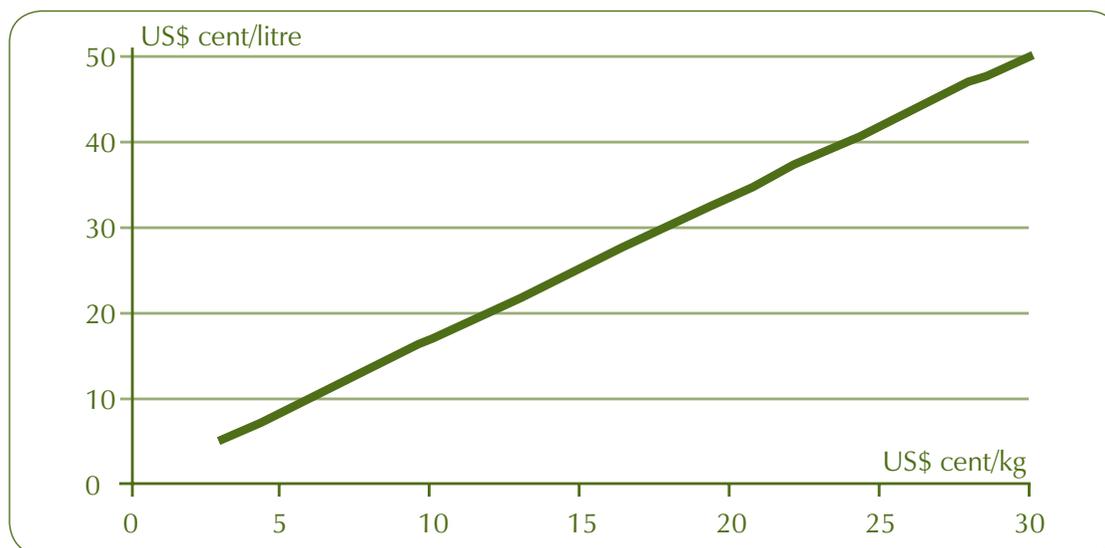
$$\text{PIEa (\$/litre)} = 1,67 * \text{PAç (\$/kg)} \quad (2)$$

Dans cette expression est considérée uniquement la valeur du saccharose, sans y inclure les coûts associés à l'investissement et au fonctionnement de l'unité de transformation. Cependant, ce prix d'indifférence est une donnée importante pour le producteur : en principe, produire du bioéthanol n'aurait un sens qu'à des prix supérieurs à celui-là. Naturellement, ce rapport physique perd son sens dans divers cas-limites, par exemple, quand le marché du sucre est saturé et que la possibilité de réduire la production de bioéthanol pour fabriquer d'avantage de sucre devient peu attrayante, puisque les prix du sucre ont tendance à baisser par excès d'offre.

L'utilisation de la mélasse ou du « miel épuisé » – sous-produit de la production du sucre – dans la production de bioéthanol permet également une analyse similaire, qui favorise, dans ce cas, le bioéthanol, car le prix de la mélasse est toujours inférieur au prix du sucre. Cependant, les disponibilités de mélasse sont toujours déterminées par la production de sucre

et peuvent être considérées comme limitées par les nécessités de production de bioéthanol dans des programmes de plus grande envergure. En effet, tandis que sur la base de l'extrait direct plus de 80 litres de bioéthanol sont produits pour chaque tonne de sucre, au moyen de la mélasse épuisée, il est produit près de 12 litres par tonne de canne traitée, en plus du sucre fabriqué. Dans tous les cas, il est très intéressant de constater que, dans la majorité des pays latino-américains ayant une production sucrière, la mélasse pourrait constituer une source de bioéthanol importante, et du type précurseur, en vue de satisfaire les nécessités internes de combustible. Par exemple, dans les pays d'Amérique Centrale, rien qu'avec l'utilisation de la mélasse disponible et sans cultiver un seul hectare additionnel de canne, il serait possible de répondre à 22% de la demande de bioéthanol nécessaire à l'introduction de 10% de ce biocarburant dans l'essence consommée, essence qui est totalement importée par ces pays [Cepal (2004)].

Graphique 5 – Prix d'indifférence de l'éthanol anhydre en fonction du prix du sucre



Source : Élaboration de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Naturellement, à cette évaluation de la viabilité de la production de bioéthanol viennent se superposer d'autres considérations, comme les engagements et les stratégies de marchés. En outre, il faut tenir compte de la variation présentée par les prix du sucre à une époque récente, comme ce fut le cas pour d'autres *commodities*, du reste. Une autre complication inévitable concerne la rigidité relative des marchés internationaux du sucre, avec un volume appréciable de produit commercialisé moyennant des quotas à des prix qui reflètent peu les effets de l'offre et de la demande. Les pays en développement attendent, avec justice, que ces distorsions se réduisent progressivement, introduisant ainsi d'avantage d'efficacité et de réalisme dans le marché du sucre. Une étude récente de la Banque Mondiale, utilisant différents scénarios de marché, présente des simulations du comportement des prix du sucre dans le cas où les marchés seraient libérés, indiquant des élévations de 2,5% à peine face aux

prix moyens actuels. Les avantages les plus expressifs concernent les pays d'Amérique Latine et d'Afrique au sud du Sahara [World Bank (2007)].

Deux références importantes pour les prix internationaux du sucre sont : a) les contrats préférentiels avec les États-Unis, dans la limite des quotas établis par le Département d'Agriculture nord-américain, à des prix déterminés par les Contrats n° 14 de la Bourse de Commerce de New York (New York Board of Trade – NYBOT), et avec l'Europe, dans le cadre des accords ACP (Africa, Caribe and Pacific) et SPS (Special Protocol Sugar), limités par des quotas attribués aux pays producteurs ; et b) les contrats libres ou d'excédents, qui peuvent suivre les prix des Contrats n° 5 de la Bourse de Londres ou les Contrats NYBOT n° 11. Bien que, dans les deux cas, ces contrats définissent les prix de référence pour le commerce international, sur base d'opérations réalisées électroniquement dans ces bourses de marchandises, les contrats préférentiels correspondent à des prix plus élevés et à des marchés plus petits, tandis que les contrats libres représentent mieux la réalité du marché international du sucre. Le Graphique 6 montre le comportement des prix du sucre selon le Contrat NYBOT n° 11 pour les dix dernières années au cours desquelles les prix ont subi des variations expressives, avec une certaine élévation du prix moyen.

Graphique 6 – Prix international du sucre (Contrat n° 11 NYBOT)

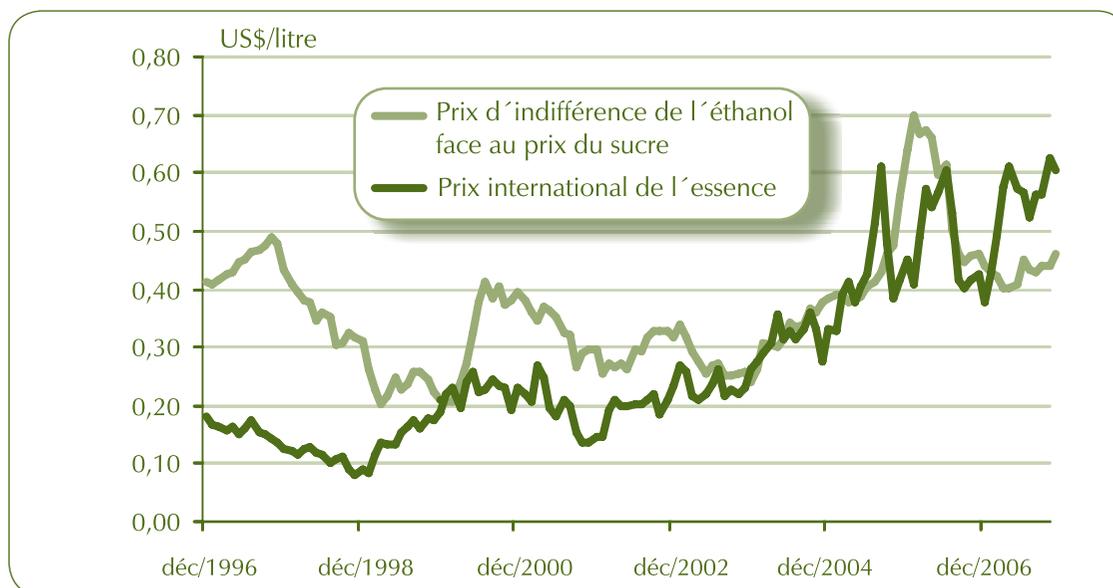


Source : NYBOT (2008).

En prenant les prix du Graphique 6 et en les appliquant dans la formule antérieure, on peut estimer les prix minima d'attractivité pour le bioéthanol, c'est à dire les prix pouvant stimuler les producteurs à utiliser de préférence leur matière première dans la fabrication du biocarburant. Considérant encore que, dans les mélanges allant jusqu'à 10%, un litre d'éthanol produit le même effet qu'un litre d'essence, comme vu antérieurement, nous pouvons comparer ces prix d'indifférence directement avec les prix de l'essence (sans taxes, et aussi au

prix de gros) pratiqués sur le marché international. Le Graphique 7 montre cette comparaison, en utilisant pour le dérivé du pétrole le prix libre de l'essence normale sur la côte du Golfe des USA (U.S. Gulf Coast Conventional Gasoline Regular Spot Price FOB).

Graphique 7 – Prix d'indifférence de l'éthanol face au sucre et au prix international de l'essence



Source : Calculé sur base de la NYBOT (2008) et EIA (2008).

La différence entre les courbes du Graphique 7 montre bien comment a évolué l'attractivité de la production de bioéthanol à partir de la canne au cours des dix dernières années, pour utilisation comme additif à l'essence. On peut identifier clairement deux phases : la période antérieure à 2003 et les années postérieures à 2003. Dans la première phase, les prix de l'essence sont restés presque toujours au-dessous de la valeur d'opportunité du bioéthanol, calculée sur base du prix international du sucre. À cette période, la production de bioéthanol dépendait, en de nombreux cas, de subventions pour couvrir ce différentiel d'attractivité, et qui se justifiaient en raison des externalités positives reconnues du bioéthanol : moins d'émissions atmosphériques, création d'emplois et réduction de la dépendance externe dans l'approvisionnement en énergie. Au cours de la période suivante, les prix se rapprochèrent assez bien et, sauf durant quelques mois pour lesquels l'essence fut meilleur marché, la fabrication de bioéthanol devint plus rentable que la production de sucre, aux prix internationaux. Dans ce sens, il est attendu que les coûts de production soient couverts et que le bioéthanol devienne le produit le plus intéressant, pour autant que les prix soient fixés comme nous l'avons exposé.

Il est important de formuler quelques réserves à propos du raisonnement antérieur. Premièrement, les prix internationaux de l'essence ne sont pas exactement ceux pratiqués comme

prix de base dans la majorité des pays, surtout dans les pays importateurs, car les prix internes sont définis en y incorporant les frets maritimes et les coûts additionnels d'importation de ces produits, élevant la courbe de prix de l'essence. D'autre part, la considération des prix internationaux du sucre comme référence d'opportunité pour la canne ne tient pas compte non plus des réductions à appliquer à l'occasion d'une exportation éventuelle. L'analyse antérieure n'a pas tenu compte non plus des matières premières bon marché, comme la mélasse, qui permettent de produire à des prix plus bas. Dans tous les cas, cette comparaison montre comment augmente la marge d'attractivité du bioéthanol, qui peut effectivement concurrencer l'essence sur les marchés, dans l'acception de Baumol (1982). En outre, il faut considérer que l'expansion du marché du sucre se heurte à des limites, tandis que le marché du bioéthanol a un potentiel d'expansion pratiquement illimité.

Pour les conditions des producteurs de l'État de São Paulo, l'Annexe 3 présente la série de prix payés aux producteurs de bioéthanol (anhydre et hydraté) entre 1975 et 2006, démontrant que ce biocarburant a été vendu, hors taxes, à des montants bien proches de ceux des prix de l'essence, de sorte que l'éventuelle adoption de mélanges bioéthanol/essence ne provoque pas de variations significatives de prix pour les consommateurs.

Tandis que la limite inférieure de la fourchette de variation de prix au producteur de bioéthanol est fixée par la plus grande différence entre les coûts de production et les prix d'opportunité des produits alternatifs de la matière première utilisée par l'agro-industrie, la limite supérieure dépend effectivement des conditions de marché, en l'absence de mécanismes d'intervention. Ainsi, et de manière compréhensible, le producteur de bioéthanol va chercher à maximiser ses résultats et à placer son produit au prix le plus élevé possible, mais son comportement devra se guider sur la présence d'autres producteurs et, éventuellement, d'importateurs, qui vont limiter ses marges à des niveaux raisonnables. Cet aspect souligne la nécessité de promouvoir les marchés de bioéthanol sur des bases compétitives, et en faisant même appel à une éventuelle importation afin d'éviter des pratiques de monopoles et de promouvoir la réduction des coûts.

Dans ce contexte économique favorable et dans l'intérêt des consommateurs, il est opportun de revoir brièvement le rôle de l'État comme promoteur du développement du marché du bioéthanol. Le bioéthanol pourra difficilement s'insérer dans le marché des combustibles d'un pays sans un support clair d'un gouvernement, qui, grâce à sa compréhension de l'importance des bénéfices et à une vision stratégique, coordonne les efforts et définit les objectifs. Si l'étape initiale et indispensable consiste en l'introduction de l'utilisation du bioéthanol anhydre comme additif à l'essence, ce qui ouvre la porte à l'utilisation du bioéthanol pur dans un avenir éventuel, quelques points sont absolument essentiels. Premièrement, en ce qui concerne le marché des combustibles, il convient de définir une spécification pour le bioéthanol et d'établir un niveau de mélange de bioéthanol avec l'essence. Il faudra la mettre en oeuvre de forme progressive et, éventuellement, dans un territoire géographique partiel, mais qui, à moyen terme, touchera toutes les régions et toutes les essences. Les expériences indéniablement couronnées de succès en cours en Colombie et en Costa Rica, par exem-

ple, offrent une excellente référence des chronogrammes et des procédures [Horta Nogueira (2007)]. Souvent, ce type de décision – en particulier, celle qui prévoit l'utilisation du bioéthanol dans l'essence – requière des altérations aux normes légales et réglementaires, même s'il faut se rappeler que les modifications introduites périodiquement aux spécifications de l'essence, comme le retrait du plomb tétraéthyle, l'introduction du MTBE et les réductions de la teneur en benzène ou en soufre, comme cela a été fait dans divers pays, ont été, dans bien des cas, objet de normes, décrets et décisions de moindre complexité législative.

Le second point essentiel pour les gouvernements est la définition d'un niveau d'impôt spécifique pour le bioéthanol, qui, tout en respectant les nécessités de l'équilibre fiscal, reconnaisse qu'il s'agit d'un produit offrant des avantages à l'utilisation, en comparaison avec l'essence, comme mentionné précédemment. Dans ce sens, il est suggéré d'adopter un niveau d'impôt différencié et qui entraîne un encouragement suffisant pour que les incertitudes et les perceptions de risque soient surmontées. Cette fiscalisation incitative entrainera la dynamique nécessaire pour que les agents économiques dans la chaîne de production et de distribution des combustibles progressent et soient également des agents actifs dans le processus de motivation des consommateurs à l'adoption du bioéthanol.

Il faut mentionner à nouveau l'expérience de pays dans lesquels l'utilisation du bioéthanol a été mise en oeuvre. Dans tous les cas, a été adopté avec succès des mécanismes fiscaux différenciés, appliquant des taux qui rendent neutre ou même attrayante pour le consommateur final l'utilisation du bioéthanol. Bien que, comme dans tout secteur énergétique, il existe une asymétrie d'informations raisonnable entre les agents économiques et le gouvernement, ce qui rend difficile une définition claire des coûts à prendre en considération, le niveau de maturité déjà atteint par le marché du bioéthanol dans certains pays et sur le marché des combustibles d'une manière générale, facilite la mise en oeuvre de niveaux d'impôts suffisamment robustes dans ce domaine. Dans ce contexte, il faut souligner l'importance de l'articulation de la production de bioéthanol avec le développement local, au moyen de l'encouragement des activités économiques en amont et en aval de la production agro-industrielle, de la création d'emplois et de l'augmentation du revenu, etc., sans parler de l'économie de devises, dans le cas d'un pays importateur de pétrole, ou de l'augmentation des recettes d'exportation pour les exportateurs de combustibles.

Naturellement, une fois prise la décision d'ajouter du bioéthanol à l'essence, et une fois établies les conditions légales pour que cette altération soit obligatoire, les réajustements au niveau des impôts ne sont pas indispensables, puisque le prix de l'essence incorpore désormais le bioéthanol comme nouvel élément de coût, souvent marginal. Cependant, les impôts et les taxes sur les combustibles sont des instruments efficaces de la politique énergétique et doivent être utilisés même pour la mise en oeuvre consistante de l'emploi du bioéthanol combustible.

Observons encore que, dans les cas où le développement du marché du bioéthanol a déjà atteint la commercialisation de l'éthanol hydraté et dispose déjà d'une flotte significative

de véhicules « flex », comme c'est le cas au Brésil, les mécanismes régulateurs et fiscaux sont nécessairement plus complexes et la formation de prix est soumise à d'autres éléments conditionnants et à d'autres standards. Par exemple, dans certaines limites, c'est le prix de l'essence qui a défini le prix du bioéthanol au Brésil ces derniers mois, constituant un plafond à respecter par les producteurs intéressés à protéger leur marché consommateur. Ce marché comporte un nombre croissant de véhicules flex, qui pourront migrer vers l'essence au cas où le prix de détail du litre de bioéthanol dépasserait d'environ 70% le prix du litre d'essence. D'autre part, le prix du bioéthanol limite également l'élévation du prix de l'essence, puisque les consommateurs qui, éventuellement, utilisent l'essence, cesseront de le faire si le bioéthanol leur paraît plus attrayant. Cet arbitrage exercé par le consommateur tient compte des coûts finaux dans l'utilisation des combustibles, qui sont, à leur tour, une conséquence des différences de consommation par kilomètre roulé, et ont constitué un stabilisateur effectif des prix des combustibles au Brésil, même en période de prix élevés du baril de pétrole.

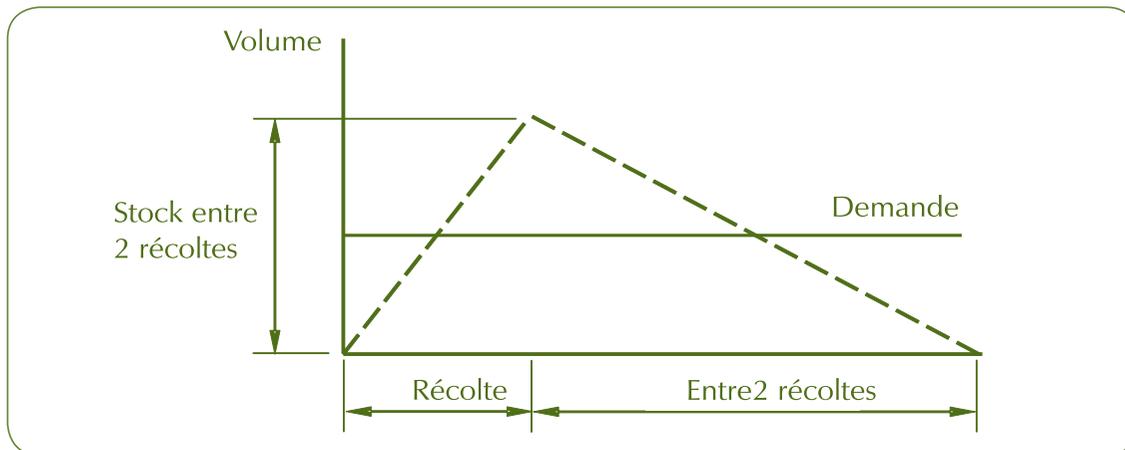
2.3 Chaînes logistiques pour l'éthanol

Après avoir présenté les conditions d'ordre technique et économique, et avoir établi un jalon de référence pour la promotion de l'utilisation de l'éthanol, il est intéressant de commenter les exigences d'infrastructure et de logistique pour sa mise en oeuvre effective. En de nombreux pays, il est reconnu que l'éthanol devrait et pourrait faire partie du modèle énergétique, mais sont invoqués des obstacles dans les infrastructures et des ressources insuffisantes pour les surmonter.

De manière générale, les conditions de transport et de stockage de l'éthanol, pur ou mélangé, ne sont pas essentiellement différentes de celles employées pour les combustibles dérivés du pétrole. Cependant, il existe au moins trois facteurs particuliers et importants dont il faut tenir compte : la saisonnalité de la production de l'éthanol, la dispersion spatiale de cette production et la compatibilité des matériaux des réservoirs et tuyauteries qui seront en contact avec l'éthanol et ses mélanges. Ces thèmes seront commentés ci-après, en prenant en considération le contexte de l'agro-industrie de l'éthanol sur base de la canne à sucre.

Comme la canne à sucre ne peut être entreposée que pendant quelques jours, pour la canne coupée manuellement, et durant quelques heures seulement pour la canne hachée cueillie à l'aide de machines, ce n'est que durant les mois de cueillette qu'il y a une production effective d'éthanol, produit qui, à son tour, est consommé régulièrement tout au long de l'année. Dans un tel contexte, on voit clairement l'importance de la durée de la récolte de la canne à sucre. Des récoltes plus longues sont toujours plus intéressantes, car elles permettent une meilleure utilisation de la capacité de production installée et une nécessité moindre d'entreposage pour la période entre deux récoltes. Dans ce sens, la production de bioéthanol de maïs ou de manioc (en cossettes sèches) présente des avantages, puisque la matière première peut être entreposée.

Figure 5 – Modèle de production, stock et demande de l'éthanol



Source : Élaboration de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Une modélisation simple des rapports entre capacité de production, stocks et demande de bioéthanol, comme le montre la Figure 5, indique comment ont lieu la formation et la consommation du stock de la période entre deux récoltes. Dans cette figure, la capacité de production additionnelle à la consommation en vue de satisfaire la demande de la période entre deux récoltes correspond à l'inclinaison de la courbe de production durant la récolte, signalant graphiquement l'impact de la durée de la récolte. Sur base de ce modèle et en considérant une demande annuelle d'un million de mètres cubes de bioéthanol, en faisant passer la durée des récoltes de 150 à 200 jours, la capacité des réservoirs exigée pour répondre à une demande constante passerait de 589 mille litres à 452 mille litres, ce qui correspondrait à une réduction de 23%. De même, cette extension de la récolte permettrait de réduire la capacité journalière de production de 6,6 mille litres à 5 mille litres, pour approvisionner un marché identique.

Ces valeurs sont des exercices théoriques. En réalité, en plus des variations de la production et de la demande au cours des mois, divers facteurs d'incertitude, notamment climatiques, recommandent de maintenir un stock de sécurité pour supporter des aléas dans l'approvisionnement. Ainsi, au début de la récolte, en général, il existe encore des stocks de bioéthanol de la récolte antérieure.

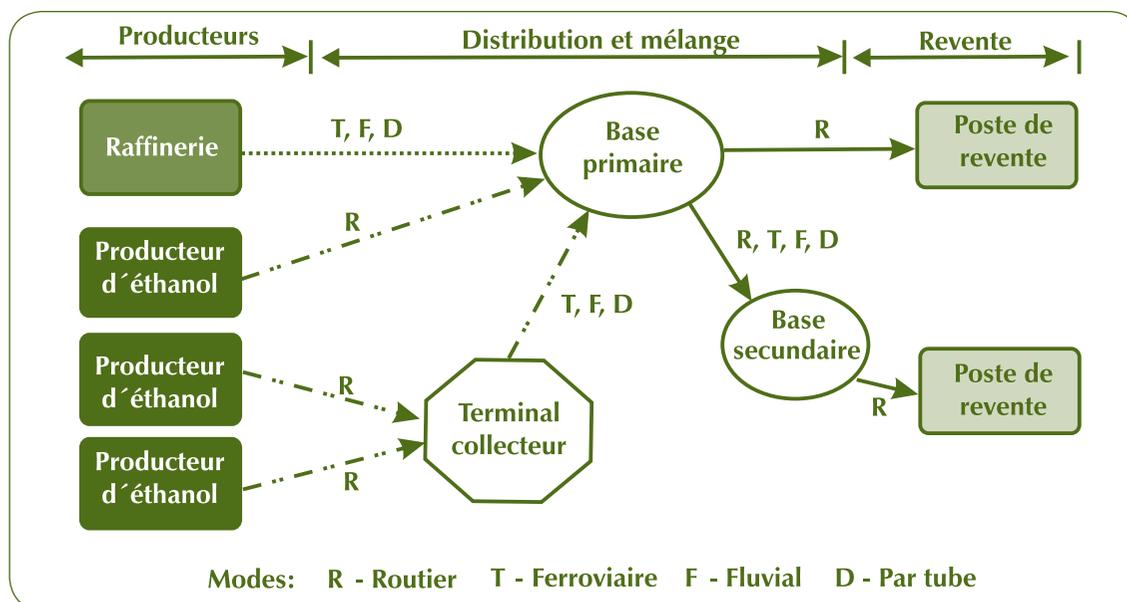
Une manière importante d'affronter les incertitudes dans l'approvisionnement de bioéthanol destiné à être mélangé avec l'essence consiste à varier les teneurs en bioéthanol en fonction des disponibilités de ce produit, dans une limite à l'intérieur de laquelle les moteurs à combustion ne présenteront pas de problèmes. Cette procédure est utilisée de façon routinière par les autorités brésiliennes pour la gestion des stocks de bioéthanol, en ajustant selon les nécessités la teneur en bioéthanol entre 20% et 25%.

Comme le bioéthanol est produit de manière relativement dispersée, avec une saisonnalité marquée, dans des unités situées en zone rurale, donc sensibles aux conditions climatiques,

et qu'il doit être mélangé à l'essence, il requière une infrastructure logistique plus complexe que les dérivés du pétrole. Le transport de quantités importantes de ce combustible – avec garantie de qualité (spécialement la teneur en eau et en impuretés) et sans affecter les installations qui servent également à d'autres produits – suppose une planification adéquate et une conception correct des systèmes et des processus, pour obtenir un système fonctionnel à des coûts tolérables. Ceci ne représente pas un défi très différent de ceux rencontrés habituellement par l'agro-industrie en général, qui dans ce cas, doit ajouter ses propres compétences à celles du secteur de distribution de combustibles. Dans le contexte brésilien, les stocks de bioéthanol des distributeurs sont suffisants pour une ou deux semaines de consommation, et sont reconstitués régulièrement par les producteurs, sans problèmes particuliers.

Il est intéressant de comprendre comment fonctionnent le stockage et le transport de bioéthanol au Brésil, pays où presque deux millions de mètres cubes de produit sont transportés chaque mois, au départ de plus de 350 unités de production, avec un système assez diversifié de modes de transport et de stockage intermédiaire [Cunha (2003)]. Dans ce système, se distinguent neuf terminaux de collecte de bioéthanol dans les principales régions productrices (états de São Paulo, Goiás, Paraná et Sergipe), avec une capacité totale de stockage de 90 mille mètres cubes. Le bioéthanol des usines productrices est reçu par transport routier et expédié par des moyens de transport plus économiques – qui peuvent être le ferroviaire, le fluvial ou le tube – vers les terminaux ou les bases primaires des distributeurs de combustible, où a lieu le mélange avec l'essence. L'essence avec du bioéthanol est alors distribuée vers les bases secondaires, ou directement vers les 35 500 stations de revente des diverses enseignes nationales et multinationales, employant à nouveau différents moyens de transport, selon la meilleure convenance ou disponibilité, comme le résume la Figure 6.

Figure 6 – Logistique de l'essence et de l'éthanol au Brésil



Source : Élaboration de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Même avec une telle diversité d'options, 70% du volume de bioéthanol commercialisé au Brésil (y compris le bioéthanol hydraté) est transporté depuis le producteur jusqu'aux bases primaires, et ensuite vers les stations de revente, en utilisant uniquement des camions-citerne, d'une capacité allant jusqu'à 30 000 litres. Tout le bioéthanol anhydre n'est pas commercialisé par l'intermédiaire des terminaux de collecte, puisqu'une partie de la production suit des chemins plus directs, surtout dans les régions plus éloignées ou dans les marchés moins importants, bien qu'il passe toujours, et nécessairement, par les bases primaires pour le mélange avec l'essence, ceci étant une exclusivité légale des distributeurs de combustible.

Cette option brésilienne de réserver exclusivement aux distributeurs l'activité de mélange de l'éthanol anhydre avec l'essence fut déterminée essentiellement par des aspects fiscaux (simplification de la perception des impôts), puisqu'en principe, le mélange du bioéthanol avec l'essence pourrait se faire dans les usines productrices, dans les raffineries ou même dans les stations de revente, au moment de faire le plein des véhicules. Cependant, il existe d'autres justifications importantes, comme la décentralisation de la production de bioéthanol et sa proximité des bases de distribution, ainsi que la nécessité de disposer d'une attribution de responsabilités claire et sans équivoque en ce qui concerne la spécification de la qualité du combustible, un aspect essentiel. Dans ce sens, le modèle d'opération utilisé au Brésil est bien clair : les raffineries produisent l'essence, les usines produisent le bioéthanol anhydre et les compagnies de distribution de combustibles préparent le mélange de ces deux produits. Ce dernier agent économique, les distributeurs, est chargé d'évaluer le produit qu'il reçoit (essence et bioéthanol) et porte également la responsabilité de la qualité du produit qu'il livre. D'autres modèles opérationnels peuvent être établis, mais il est fondamental que la chaîne de responsabilités se rapportant à la qualité du combustible soit bien définie et soit surveillée de manière adéquate par le gouvernement [ANP (2008)].

En termes pratiques, la préparation du mélange d'essence et du bioéthanol dans les bases de distribution s'effectue en des réservoirs de grande capacité – alimentés en mode continu par de l'essence et du bioéthanol, sous un contrôle strict du processus de mélange et qualité – ou dans le camion-citerne lui-même, dont les mouvements durant le transport garantissent l'homogénéité nécessaire du combustible après quelques minutes de trafic normal. Cette dernière manière de préparer le mélange essence/éthanol est connue en anglais comme *splash blending* et peut être adoptée à bas coût. Il convient d'observer que la mesure de la teneur en éthanol dans le mélange est effectuée avec une rapidité et une exactitude suffisantes, à l'aide d'une méthode assez simple et directe (absorption de l'éthanol présent dans l'essence au moyen d'un mélange avec de l'eau salée et mesure de volumes correspondants en burette). Cette procédure expéditive, utilisée également dans les stations-service, est standardisée par la norme brésilienne ABNT NBR 13.992 : Essence Automobile – détermination de la teneur d'alcool éthylique anhydre combustible, révisée en 1997.

Pour l'adaptation complète (réservoirs, systèmes de mélange et de contrôle) de quatre bases de distribution devant introduire 7% de bioéthanol dans l'essence consommée au Costa Rica, ce qui représente 60 millions de litres de bioéthanol par an, un coût total de US\$ 5 millions a été

estimé, ce qui équivaut à 3% des dépenses engagées par ce pays en 2006 pour l'importation de combustibles [Ulate (2006)].

Quand il s'agit de transporter des volumes importants, l'utilisation de canalisation pour le transport de bioéthanol et de l'essence peut être la solution la plus recommandable, bien que certains opérateurs affirment que ce genre d'utilisation est inadéquat pour l'éthanol. En effet, comme l'éthanol est potentiellement plus corrosif et agit comme solvant sélectif, en plus d'absorber davantage d'eau que les dérivés du pétrole, il impose des précautions additionnelles, comme le contrôle systématique de l'état des tubes et leur propreté méticuleuse afin d'éviter des tirages indésirables. De toute manière, ces difficultés ont été surmontées et ce mode de transport est utilisé de plus en plus pour ce biocarburant, au Brésil et aux États-Unis [API (2007)]. Dans ce sens, il est important de mentionner que Petrobras a acquis une grande expérience dans le transport de ce biocarburant au cours des dernières décennies, en transportant chaque année quelques millions de mètres cubes de bioéthanol. Plus de 200 travaux techniques ont été publiés et plus de 40 procédures opérationnelles ont été émises sur des thèmes techniques liés à la logistique du bioéthanol dans le contexte de l'industrie du pétrole. Toujours selon cette entreprise, en 30 ans d'opération de canalisation avec des volumes importants de bioéthanol, aucun cas de corrosion sous tension n'a été constaté (*stress corrosion cracking* – SCC), risque évoqué comme étant potentiellement associé à ce produit [Gomes (2008)].

Divers projets sont actuellement en développement au Brésil pour l'expansion de la capacité des canalisation à bioéthanol, prévoyant même des systèmes de longue distance destinés exclusivement au bioéthanol d'exportation. Une grande compagnie opératrice d'oléoducs aux États-Unis, Williams Energy Services, indique avoir expédié régulièrement et sans problèmes de l'essence avec du bioéthanol dans ses réseaux [Whims (2002)], tandis qu'ont été lancés des projets de oléoducs exclusifs pour le bioéthanol aux États-Unis [Mears (2007)].

Les aspects logistiques doivent être considérés importants pour le bon développement de l'utilisation du bioéthanol combustible. Les questions varient cas par cas, et des solutions spécifiques ont été mises en oeuvre avec succès, toujours associées à une planification adéquate. Les difficultés rencontrées dans des contextes aussi différents que les États-Unis [Keese (2003)] et l'Inde [Balaji (2002)], durant l'introduction d'une utilisation plus importante de bioéthanol il y a quelques années, furent associées fondamentalement aux limitations logistiques, et à l'absence d'infrastructure suffisante de transport et de stockage du biocarburant. De telles expériences recommandent expressément de mettre en oeuvre ces programmes par étapes, en renforçant progressivement les capacités, afin de conquérir peu à peu une confiance plus grande de la part du marché et des consommateurs.

Deux facteurs fondamentaux pour le succès de l'utilisation du bioéthanol au Brésil, qui différencient fondamentalement l'expérience brésilienne de celle enregistrée en d'autres pays, sont l'ample couverture géographique et le nombre élevé de postes d'approvisionnement de combustible qui revendent le produit. Comme on l'a vu, actuellement tous les 35.500

postes de revente de combustible dans le pays commercialisent le bioéthanol hydraté et le mélange de l'essence avec le bioéthanol (excepté pour le cas particulier de l'essence d'aviation, il n'existe pas, au niveau des détaillants, de vente d'essence pure dans le pays). Le développement de cette infrastructure remarquable est le résultat d'un effort qui a commencé aux débuts du Programme « Proálcool » et qui a été consolidé au fil du temps. Il est impératif de reconnaître que, sans la détermination politique de créer une telle infrastructure et sans l'appui des entreprises de distribution de combustibles et de Petrobras, qui durant des années a supporté la responsabilité de l'acquisition, du mélange et de la distribution du bioéthanol pur en mélange avec l'essence, l'expérience brésilienne du bioéthanol n'aurait pas atteint l'importance qu'elle a acquise.



Chapitre 3

Production de bioéthanol

De façon analogue à la production des boissons alcooliques, qui est normalement réalisée de diverses manières, la production de biocarburants à base de matières premières végétales peut être effectuée à l'aide de solutions technologiques distinctes, ayant chacune leurs avantages et inconvénients, comme le montre le Tableau 6. Parmi ces filières énergétiques utilisant l'énergie solaire, le bioéthanol se distingue, clairement, par le fait d'être l'alternative la plus mûre et d'insertion effective dans les modèles énergétiques de divers pays. En 2006, le bioéthanol a représenté une offre énergétique égale à près de 3% de la demande mondiale d'essence et plus de dix fois supérieure à la production de biodiesel sur la même période [EIA 2008]. Le Tableau 6 ne liste que les solutions actuellement mises en oeuvre à échelle commerciale ; les autres alternatives en développement, comme celle de l'hydrolyse de matériaux cellulosiques, seront commentées ultérieurement.

Dans ce chapitre est présentée la production de bioéthanol pour les matières premières et technologies principales. Pour chaque cas est offert une vision panoramique des étapes agricole et industrielle, en indiquant leurs conditions de mise en oeuvre et leurs niveaux de productivité actuels et futurs. Ainsi, seront successivement détaillés les systèmes de production de bioéthanol de canne à sucre et de maïs, qui représentent une grande partie de la production mondiale, et aussi, de manière plus succincte, les systèmes de production de bioéthanol à base d'autres matières premières, comme le manioc, le blé, la betterave et le sorgho. Après avoir caractérisé ces solutions de production, seront présentées quelques recommandations sur les critères à prendre en considération dans la sélection des matières premières qui peuvent être adoptées pour la production de bioéthanol, parmi lesquelles se trouvent l'efficacité globale dans l'utilisation de ressources naturelles (y compris l'énergie) pour la conversion de

l'énergie solaire en biocarburant et l'émission associée de gaz à effet de serre par unité énergétique disponible. En fin de chapitre seront indiquées des valeurs pour ces paramètres pour le bioéthanol de canne à sucre et le bioéthanol de maïs.

3.1 Matières premières et technologies de production du bioéthanol

Au moyen de solutions biologiques, le bioéthanol peut être produit à partir de n'importe quelle biomasse contenant des quantités significatives d'amidon ou de sucres. Actuellement, il y a une légère prédominance de la production à base de matériaux amylacés (53% du total), comme le maïs, le blé et d'autres céréales et grains. Dans ces cas, la technologie de conversion commence généralement par la séparation, le nettoyage et la mouture du grain. La mouture peut être humide, quand le grain est imbibé et fractionné avant la conversion de l'amidon en sucre (voie humide), ou sèche, quand cela se fait durant le processus de conversion (voie sèche). Dans les deux cas, l'amidon est converti typiquement en sucres au moyen d'un processus enzymatique à haute température. Les sucres libérés seront alors fermentés par des levures et le liquide résultant sera distillé pour la séparation du bioéthanol. En plus du bioéthanol, ces processus engendrent généralement divers coproduits, qui varient selon la biomasse utilisée.

Tableau 6 – Tableau général des biocarburants

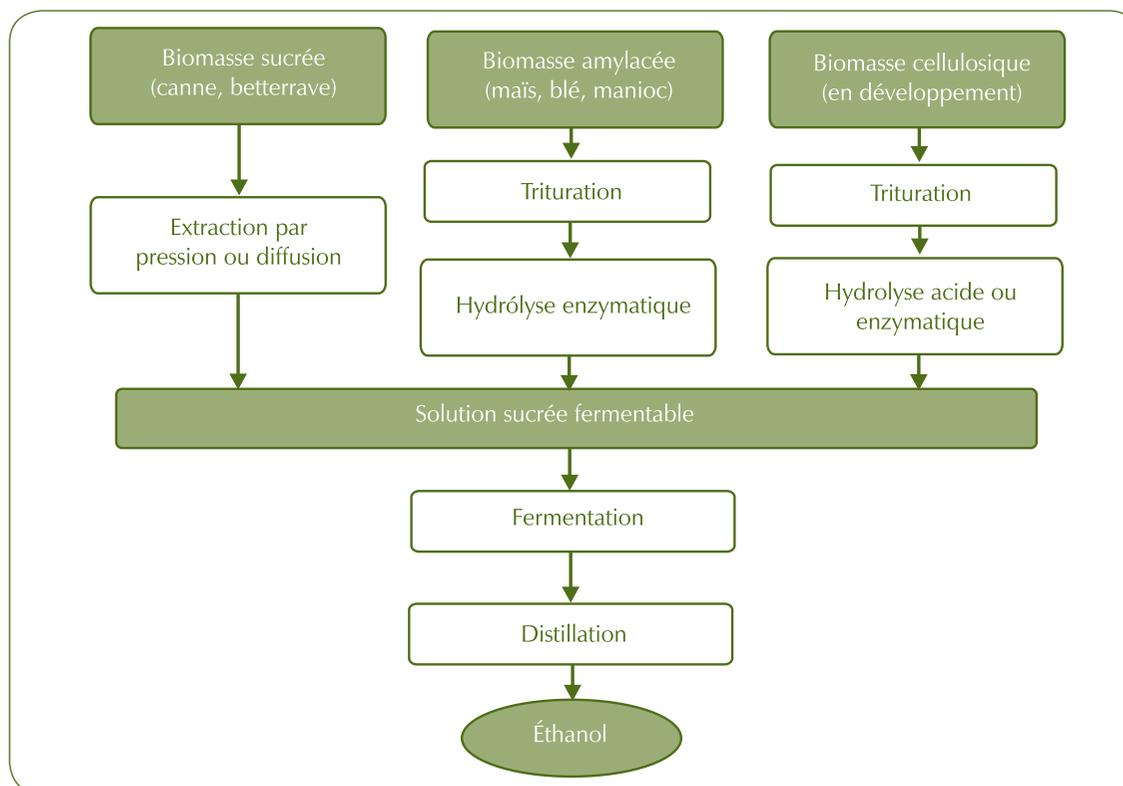
| Biocarburant | Matière première | Réduction de l'émission de gaz à effet de serre | Coût de production | Production de biocarburant par hectare | Terres utilisées |
|--------------|--|---|--------------------|--|----------------------------|
| Bioéthanol | Grains (blé, maïs) | Modéré à bas | Modéré | Modéré | Terres fertiles |
| Bioéthanol | Canne à sucre | Élevé | Bas | Élevé | Terres fertiles |
| Biodiesel | Huiles de semences (canola, soya etc.) | Modéré | Modéré | Bas | Terres fertiles |
| Biodiesel | Huile de palme | Modéré | Modéré à bas | Modéré | Terres côtières et humides |

Source : Adapté de IEA (2005).

Considérant la production à base de sucres, comme c'est le cas de la canne et de la betterave, le processus est plus simple et comprend une étape en moins, puisque les sucres sont disponibles dans la biomasse. Normalement, le processus se base sur l'extraction des sucres (au moyen de la mouture ou de la diffusion), qui peuvent être soumis directement à une fermentation. Après la fermentation, le liquide est distillé, comme dans le cas de la production à base d'amidon. La Figure 7 résume les solutions technologiques pour la production de

bioéthanol, en tenant compte des différentes matières premières d'intérêt. La production de bioéthanol à partir de cellulose en est encore au niveau du laboratoire et des usines-pilote, sans poids réel dans le contexte énergétique actuel et avec des obstacles technologiques et économiques à surmonter.

Figure 7 – Solutions technologiques pour la production d'éthanol

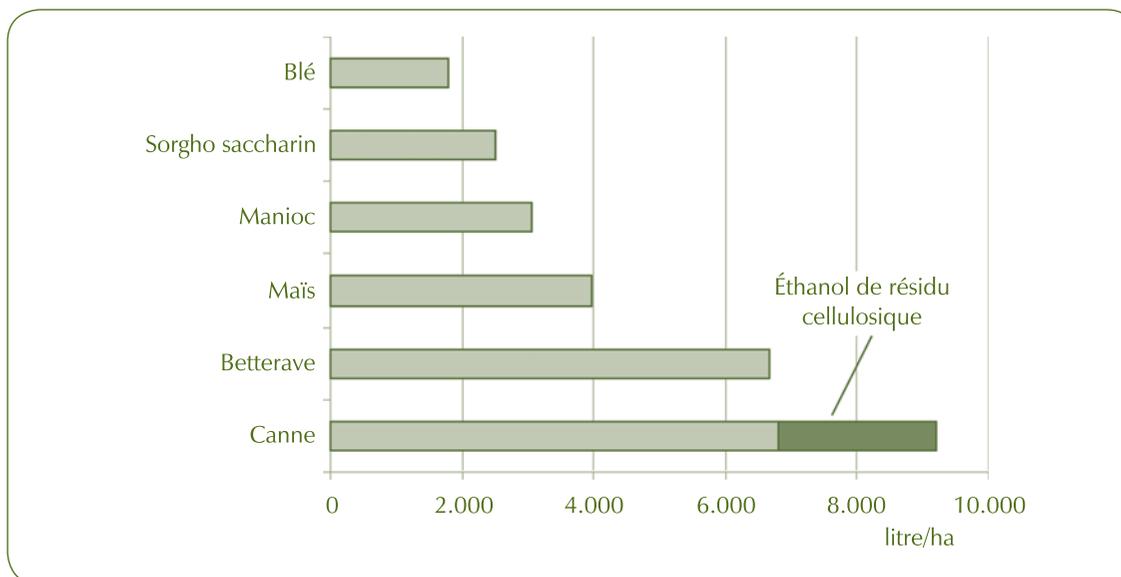


Source : Élaboration de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Une comparaison entre les différentes solutions pour la production de bioéthanol est présentée au Graphique 8, qui met en évidence de grands écarts entre les indices de productivité par unité de terrain cultivé. Ces résultats correspondent à des cultures en situation de bonne productivité, qui dans certains cas peuvent exiger une utilisation élevée d'intrants. Ils ont été tirés de la littérature [CPC (2008)] et modifiés pour la cas de la canne et du sorgho, en fonction des analyses présentées plus loin dans ce travail. Les technologies industrielles implicites dans ce graphique, pour la conversion de sucres et d'amidon en bioéthanol, peuvent être considérées mûres et disponibles, sauf celles relatives à l'hydrolyse de matériaux lignocellulosiques, actuellement en développement, adoptées pour l'obtention de bioéthanol de la partie cellulosique de la canne. Pour la canne, il a été considéré dans le Graphique 8 une production de 80 tonnes

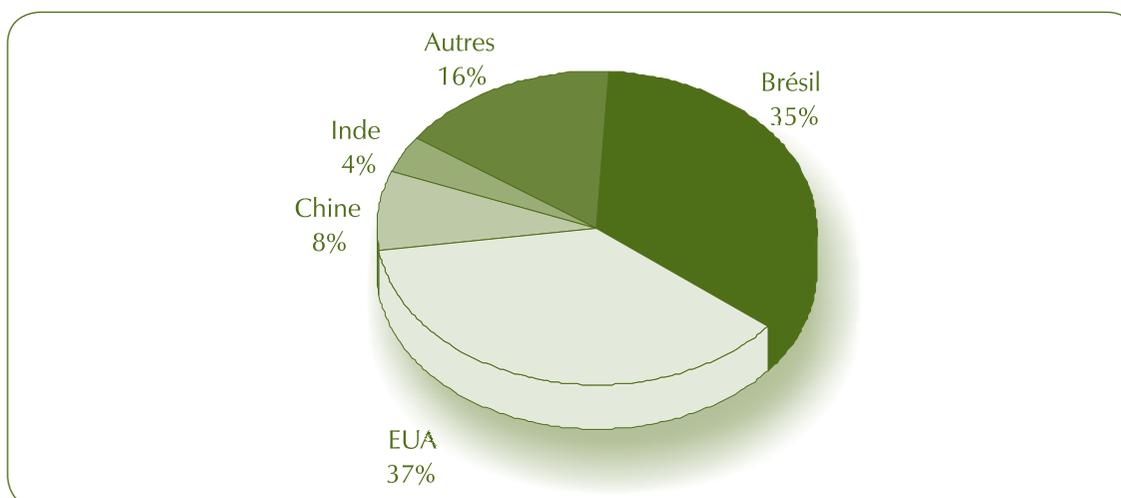
de canne par hectare, une productivité de 85 litres de bioéthanol par tonne de canne traitée, l'utilisation de 30% de la bagasse disponible et de la moitié de la paille, convertie en bioéthanol à raison de 400 litres par tonne de biomasse cellulosique sèche.

Graphique 8 – Productivité moyenne de l'éthanol par surface pour différentes cultures



Source : Modifié de GPC (2008).

Graphique 9 – Distribution de la production mondiale d'éthanol en 2006



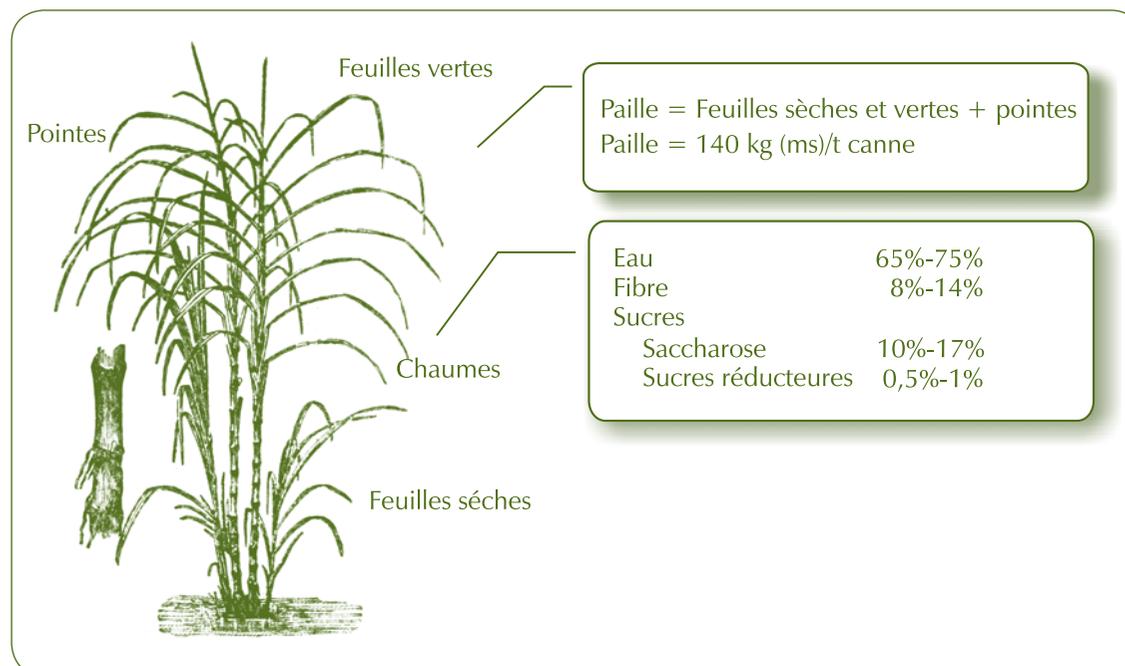
Source : Élaboré sur base de RFA (2008).

Des 51 milliards de litres de bioéthanol produits en 2006 [F. O. Licht (2006)], la production américaine, à base de maïs, et la production brésilienne, à base de canne, représentèrent 70% du total, comme le montre le Graphique 9 [RFA (2008)]. En raison de leur énorme importance dans le contexte des biocarburants, seront discutées ci-après, avec un peu plus de détails, les technologies de production relatives à chacune de ces biomasses, y compris les aspects agricoles les plus importants.

3.2 Bioéthanol de canne à sucre

La canne à sucre est une plante semi-pérenne avec un cycle photosynthétique du type C4, appartenant au genre *Saccharum*, de la famille des graminées, composée d'espèces de hautes herbes pérennes, originaires de régions tempérées chaudes à tropicales d'Asie, spécialement de l'Inde. La partie aérienne de la plante est composée essentiellement de *chaumes* (ou tiges), dans lesquels se concentre le saccharose et de *pointes* et de *feuilles*, qui constituent la paille de la canne, comme le montre la Figure 8. Tous ces composants mis ensemble totalisent près de 35 tonnes de matière sèche par hectare.

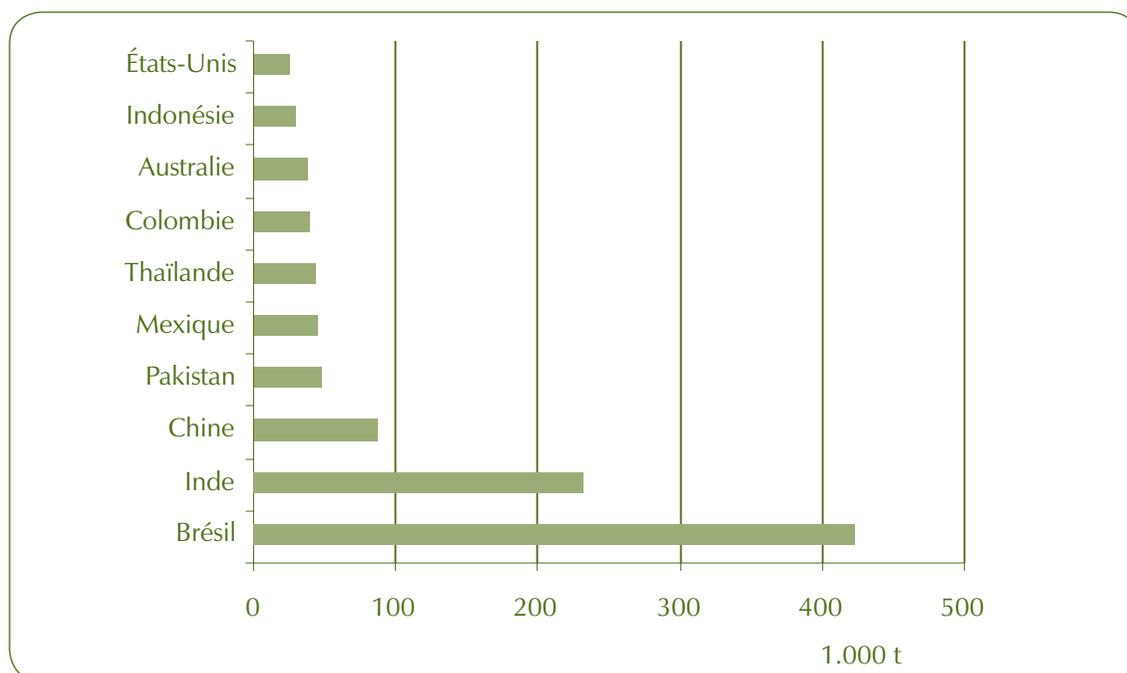
Figure 8 – Structure typique de la biomasse de la canne



Source : Seabra (2008).

Une des cultures commerciales de plus grande importance dans le monde entier, la canne à sucre occupe plus de 20 millions d'hectares, ayant produit environ 1.300 millions de tonnes en 2006/2007, avec une mention spéciale pour le Brésil, qui, avec une surface plantée de presque 7 millions d'hectares, est responsable de près de 42% du total produit. L'année sucrière, adoptée internationalement, commence en septembre et termine en août de l'année suivante. Le Graphique 10 présente les dix principaux pays producteurs de canne pour la récolte de 2005 [FAOSTAT (2007)].

Graphique 10 – Principaux pays producteurs de canne à sucre en 2005



Source : FAO (2007).

Le climat idéal pour la culture de la canne est celui qui présente deux saisons distinctes : une chaude et humide, pour permettre la germination, la croissance et le développement végétatif, suivie d'une autre saison froide et sèche, afin de promouvoir la maturation et l'accumulation conséquente de saccharose dans les chaumes. La canne ne présente pas une bonne productivité dans des climats tels que ceux des régions équatoriales humides, et pour cette raison, cela n'aurait pas de sens d'imaginer que l'Amazonie se prête à des grandes cultures commerciales de cette plante.

Le cycle complet de la canne à sucre est variable, et dépend du climat local, des variétés et des pratiques culturales. Au Brésil, le cycle est généralement de six ans, pendant lesquels sont réalisées cinq coupes, quatre traitements des racines et une réforme (replantation), comme

expliqué plus loin. De manière générale, la première coupe a lieu 12 ou 18 mois après la plantation (cela dépend de la variété utilisée), pour la récolte de la « canne-plantée ». Les autres coupes, dites de la « canne-repousse », sont faites une fois par an, au long des quatre années consécutives, avec une réduction graduelle de la productivité, jusqu'à ce qu'il devienne économiquement plus intéressant de réformer la plantation de canne à sucre plutôt que d'effectuer une nouvelle coupe. L'ancienne canne est alors remplacée par une nouvelle implantation et un nouveau cycle de production commence. Dans cette réforme de la plantation de canne à sucre, la surface cultivée reste en repos quelques mois et peut alors recevoir d'autres cultures à cycle court, comme des légumineuses.

Considérant le cycle productif de la canne, pour obtenir une production plus ou moins stable au fil des diverses récoltes et pour rationaliser l'utilisation des moyens de production agricoles (machines et main-d'œuvre), les zones de production doivent être subdivisées en terrains affectés aux différentes étapes du cycle, correspondant, pour un cycle de six ans, à environ un sixième de la superficie totale pour chaque étape. Une autre conséquence importante de ce cycle est que, dans l'implantation d'une unité de production de bioéthanol de canne, les activités agricoles doivent être démarrées deux ou trois ans avant la production industrielle effective, au début pour multiplier les plants et atteindre, après début des récoltes, une production plus ou moins stable de matière première dans un délai de trois à quatre ans. Des techniques sont en voie de développement pour réduire les coûts et préserver la fertilité du sol, comme la culture par semis direct et l'emploi de Structures de Traffic Contrôlé (ETCs) pour les opérations agricoles, ce qui permet d'augmenter le nombre de coupes tout en maintenant la productivité à des niveaux élevés. [CGEE (2007b)].

Il est intéressant d'observer que, comme le cycle productif typique de la canne présente cinq coupes au long de six ans, la productivité moyenne annuelle doit tenir compte également de la période de réforme de la plantation de canne à sucre. En outre, comme une partie de la canne produite (près de 8%) est destinée à la réforme (replantation) des cannes à sucre, la productivité annuelle moyenne en tonnes de canne traitée effectivement par hectare est inférieure à la productivité totale évaluée en termes de canne récoltée.

En moyenne, la productivité annuelle, assez influencée par le caractère variable du climat et par la région productrice, se situe entre 50 t/ha et 100 t/ha (poids de tiges humides), plaçant la moyenne brésilienne aux environs de 70 t/ha plantée, une valeur comparable aux meilleures régions productrices en d'autres pays. Bien qu'aient été observées des productivités de canne atteignant jusqu'à 200 t/ha [Janick (2007)], dans la région Centre-Sud du Brésil où sont établies la plupart des usines brésiliennes ces indices se situent entre 78 t/ha et 80 t/ha, tandis que dans l'État de São Paulo, principal producteur, ils se situent au niveau de 80 t/ha à 85 t/ha, en considérant dans les deux cas un cycle de cinq coupes [Unica (2008)]. L'Annexe 2 présente les chiffres de la productivité moyenne de la canne au Brésil, en tonnes par hectare récolté.

Figure 9 – Distribution des 350 usines de traitement de la canne à sucre au Brésil



Source : CGEE (2006).

Une vision des principaux paramètres de la culture de la canne à sucre dans les conditions du Centre-Sud brésilien est présentée au Tableau 7 [Macedo (2006) et CTC (2005)]. Dans ce tableau, les valeurs de teneur en saccharose (exprimée en unité « pol ») et de fibre, en pourcentage de masse de canne, correspondent, respectivement, à la teneur en saccharose apparent et en bagasse disponibles dans la canne. Outre le saccharose, selon sa maturation, la canne contient près de 0,5% d'autres sucres (comme le glucose et le fructose), sans intérêt pour la production de sucre solide, mais pouvant être utilisés pour la fabrication de bioéthanol [Fernandes (2003)].

Tableau 7 – Principaux paramètres agricoles de la canne

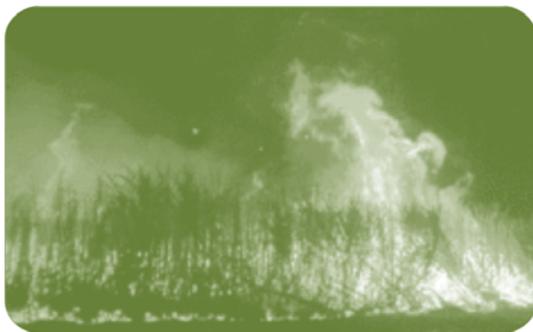
| Indicateur | Valeur |
|--|--------------------------------------|
| Productivité | 87,1 tc/ha |
| Récolte de canne à sucre (sans brûlis) | 30,8% |
| Récolte mécanique | 49,5% |
| Pol % canne (teneur en saccharose) | 14,22 |
| Fibre % canne (teneur en bagasse) | 12,73 |
| Fertilisants | |
| P ₂ O ₅ | |
| Canne-plante | 120 kg/ha |
| Canne-racine sans vinasse | 25 kg/ha |
| K ₂ O | |
| Canne-plante | 120 kg/ha |
| Canne-racine sans vinasse | 115 kg/ha |
| Azote | |
| Canne-plante | 50 kg/ha |
| Canne-racine avec vinasse | 75 kg/ha |
| Canne-racine sans vinasse | 90 kg/ha |
| Calcaire | 1,9 t/ha (seulement à la plantation) |
| Herbicide | 2,20 kg/ha (valeur recommandée) |
| Insecticide | 0,12 kg/ha (valeur recommandée) |
| Autres produits phytosanitaires | 0,04 kg/ha |
| Application de tourteau filtre | 5 t (base sèche)/ha |
| Application de vinasse | 140 m ³ /ha |

Source : Macedo (2006) et CTC (2005).

Comme indiqué au Tableau 7, la demande de fertilisants pour la culture de la canne est réduite comparée à d'autres cultures, en grande partie à cause des résidus industriels, qui retournent aux champs. L'utilisation d'engrais azotés de synthèse est basse, et dans les endroits où la vinasse est appliquée, tout le potassium est fourni par la ferti-irrigation. Bien qu'il s'agisse d'une culture avec une demande élevée en eau, des indices pluviométriques supé-

rieurs à 800 mm (idéalement, entre 1.200 mm et 1.500 mm) et distribués de forme adéquate (périodes pluvieuse et sèche bien définies) sont suffisants pour atteindre une bonne productivité. Dans des unités de production typiques du Centre-Sud brésilien (en utilisant la moitié de la canne pour le sucre et l'autre pour le bioéthanol), l'application de vinasse représente près de 15 mm à 20 mm dans 30% de la plantation de canne à sucre et élimine pratiquement la nécessité d'irrigation. Les valeurs présentées pour l'application de vinasse et de tourteau de filtration se rapportent aux valeurs recommandées sous des conditions typiques pour l'État de São Paulo, conformément à la législation environnementale.

La période de la récolte de la canne varie selon le régime des pluies, de manière à permettre les opérations de coupe et de transport, et pour permettre d'atteindre le meilleur point de maturation et d'accumulation de sucres. Dans la Région Centre-Sud du Brésil, la récolte va d'avril à décembre, tandis que dans la Région Nord-Est, elle va d'août à avril. Le système traditionnel de récolte, toujours utilisé dans près de 70% des cultures de canne à sucre au Brésil, comprend le brûlis préalable de la plantation de canne à sucre et la coupe manuelle de la canne entière. Cependant, ce modèle est substitué progressivement par la récolte mécanique de la canne à sucre, hachée et sans brûlis, en raison des restrictions environnementales à la pratique du brûlis. Grâce aux accords signés récemment entre le gouvernement et les producteurs, il est attendu que, d'ici à 2020, toute la canne sera récoltée mécaniquement, sans brûlis préalable.



(a)

(b)

Récolte de la canne : (a) manuelle avec brûlis et (b) mécanique sans brûlis.

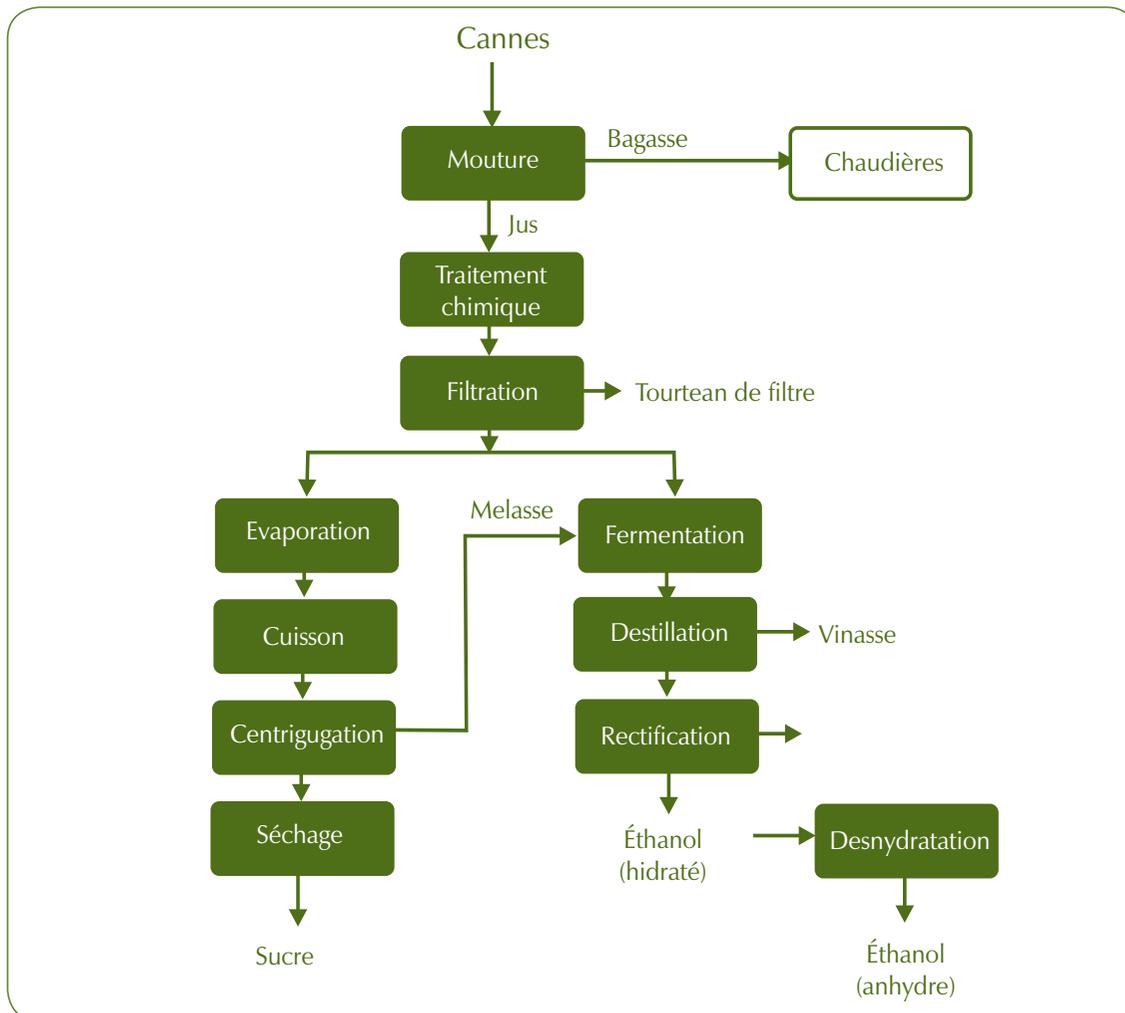
Après la coupe, la canne est transportée le plus tôt possible vers l'usine, afin d'éviter les pertes de saccharose. Excepté pour les quelques entreprises qui utilisent un transport fluvial, le système de transport est basé sur les camions, avec diverses possibilités – camion simple, double (« Roméo-Juliette »), « rain-camion », « train-routier » – dont la capacité de charge varie de 15 à 60 tonnes. Précisons que la logistique de la canne, englobant les opérations intégrées de coupe, de chargement et de transport, passe ces dernières années par une évolution continue afin de réduire les coûts et de diminuer le niveau de compactation du sol.



Transport de canne à sucre par « train-camion » au Brésil.

La canne ne peut pas être stockée pendant plus de quelques jours, et indépendamment du type d'installation, les usines tournent seulement durant la période de récolte. Les étapes initiales du traitement pour le bioéthanol sont pratiquement les mêmes que celles employées pour la production de sucre, comme le montre la Figure 10. Une fois à l'usine, la canne est en général lavée (seulement la canne entière) et acheminée vers le système de préparation et d'extraction, qui au Brésil est basé essentiellement sur des pressoirs, c'est-à-dire que l'extraction du jus se fait sous pression de rouleaux, montés en groupes avec quatre à sept trios successifs de meules. Dans l'ensemble de rouleaux, le jus, qui contient le saccharose, est séparé de la fibre (bagasse), qui est envoyée vers le générateur d'énergie dans laquelle elle est utilisée comme combustible. Dans quelques nouvelles unités implantées au Brésil a été adopté l'extraction par diffusion, en vue d'en tirer des avantages du point de vue énergétique. Dans les diffuseurs, la canne hachée et défibrée passe par des lavages successifs à l'eau chaude, perdant par lixiviation ses sucres, et passe finalement par un rouleau de séchage d'où sort la bagasse prête à être utilisée dans les chaudières. Produit dans le pressoir ou dans le diffuseur, le jus contenant les sucres de la canne peut, alors, être destiné à la production de sucre ou de bioéthanol.

Figure 10 – Diagramme de flux de la production de sucre et de bioéthanol de canne



Source : Seabra (2008).

Pour la production de sucre, le jus est d'abord tamisé et traité chimiquement afin de réaliser la coagulation, la floculation et la précipitation des impuretés qui sont éliminées par décantation. Le tourteau de filtration, utilisé comme engrais, résulte de la récupération de sucre dans les boues du décanteur, via des filtres rotatifs à vide. Le jus traité est alors concentré dans des évaporateurs à effet multiple et cristallisé. Dans ce processus, une partie seulement du saccharose disponible dans la canne est cristallisée et la solution résiduelle riche en sucre (le miel) peut suivre à nouveau plus d'une fois le même processus afin de récupérer d'avantage de sucre. Le miel final, appelé aussi mélasse, et qui ne retourne pas au processus de fabrication de sucre, contient encore du saccharose et une teneur élevée de sucres réducteurs (comme le glucose et le fructose, résultant de la décomposition du saccharose), pouvant être utilisé comme matière première pour la production du bioéthanol, moyennant fermentation.

C'est ainsi que la production de bioéthanol de canne à sucre peut se baser sur la fermentation du seul jus de la canne mais aussi sur des mélanges de jus et de mélasse, comme cela est le plus fréquemment pratiqué au Brésil. Dans le cas du bioéthanol de jus seul, les premières étapes du processus de fabrication, de la réception de la canne au traitement initial du jus, sont semblables au processus de fabrication du sucre. Dans un traitement plus complet, le jus passe par le chaulage, le chauffage et la décantation, comme dans le processus d'obtention du sucre. Une fois traité, le jus est évaporé pour ajuster sa concentration de sucres et, éventuellement, mélangé avec la mélasse, donnant ainsi le moût, une solution sucrée et prête à être fermentée.

Le moût est envoyé dans les cuves de fermentation, où, après ajout de levures (champignons unicellulaires de l'espèce *Saccharomyces cerevisiae*), il fermente pour un période de 8 à 12 heures, et se transforme en « vin » (moût fermenté avec une concentration de 7% à 10% d'alcool). Le processus de fermentation le plus utilisé dans les distilleries du Brésil est le Mel-le-Boinot, dont la caractéristique principale est la récupération des levures du vin au moyen de la centrifugation. Ainsi, après la fermentation, les levures sont récupérées et traitées pour une nouvelle utilisation, tandis que le vin est envoyé aux colonnes de distillation.



Usine de traitement de canne à sucre au Brésil.

Par distillation, le bioéthanol est récupéré initialement sous la forme hydratée, à une concentration d'environ 96° GL (pourcentage en volume, correspondant à près de 6% d'eau en poids). Le résidu de distillation est la vinasse, normalement dans une proportion de 10 à 13 litres de vinasse par litre de bioéthanol hydraté produit. Dans ce processus, d'autres fractions liquides sont également séparées, donnant naissance aux alcools de seconde catégorie et à l'huile de fusel. Le bioéthanol hydraté peut être stocké comme produit final ou peut être envoyé dans une colonne de déshydratation. Mais, s'agissant d'un mélange azéotropique, ses

composants ne peuvent être séparés par une simple distillation. La technologie plus utilisée au Brésil est la déshydratation par addition du cyclohexane, formant un mélange azéotropique ternaire, avec un point d'ébullition inférieur à celui du bioéthanol anhydre. Dans la colonne de déshydratation, le cyclohexane est additionné au sommet et le bioéthanol anhydre est retiré au fond, à environ 99,7° GL (ou 0,4% d'eau en poids). Le mélange ternaire retiré du sommet est condensé et décanté, tandis que la partie riche en eau est envoyée à la colonne de récupération de cyclohexane.

La déshydratation du bioéthanol peut aussi être faite par absorption au moyen de membranes moléculaires ou par distillation extractive avec du monoéthylèneglycol (MEG), techniques qui se caractérisent par une moindre consommation d'énergie et aussi par des coûts plus élevés. En raison des exigences croissantes du marché international, divers producteurs de bioéthanol au Brésil et en d'autres pays optent pour les membranes moléculaires qui sont capables de produire un bioéthanol anhydre exempt de contaminants.

La possibilité d'utiliser les sucres de la canne en totalité ou en partie pour la production de bioéthanol représente une flexibilité importante pour cette agro-industrie qui, en fonction des conditions de prix, de la demande existante et des perspectives de marché, peut arbitrer, dans certaines limites, en vue de minimiser le coût de production et maximiser le bénéfice économique. C'est exactement pour profiter de cet avantage que diverses usines brésiliennes ont des lignes de fabrication de sucre et de bioéthanol capables de traiter chacune 75% du jus produit, représentant une marge de sur-capacité de 50% par rapport à la capacité d'extraction des pressoirs.

L'utilisation d'eau dans le processus est relativement élevée. Actuellement, dans les conditions du Centre-Sud brésilien, elle se situe autour de 1,8 m³ par tonne de canne traitée. Mais elle peut être réduite de manière significative par l'implantation de systèmes de réutilisation, qui permettent de réduire aussi bien le niveau de prélèvement que l'élimination d'eaux usées. Cet aspect sera mieux analysé au Chapitre 6.

Considérant tout le processus de production de bioéthanol de canne, les résidus consistent en vinasse (entre 800 et 1.000 litres par tonne de canne traitée pour le bioéthanol), en tourteau de filtration (environ 40 kg humides par tonne de canne traitée) et en cendres des chaudières [Elia Neto (2007)]. Comme déjà indiqué, ces résidus sont valorisés dans les usines brésiliennes et constituent effectivement des sous-produits qui sont recyclés et utilisés comme fertilisants, contribuant ainsi à réduire de manière significative les besoins en fertilisants minéraux et à éviter la contrainte d'irrigation dans les plantations de canne à sucre.

La production du bioéthanol nécessitant l'élimination d'une grande quantité d'eau, la demande en énergie est élevée, spécialement en énergie thermique, comme le montre le Tableau 8, élaboré sur base de Pizaia (1998). Dans ce tableau, la demande de vapeur pour la production de bioéthanol, hydraté et anhydre, est indiquée, respectivement, avec la technologie conventionnelle consommant de 3,0 kg à 3,5 kg de vapeur par litre de bioéthanol hydraté

et avec un processus de distillation azéotropique au cyclohexane consommant 1,5 kg à 2,0 kg de vapeur par litre de bioéthanol anhydre. Concernant la demande en énergie électrique, il y a de légères différences entre les processus, mais tous sont proches de la valeur présentée de 12 kWh par tonne de canne traitée.

Tableau 8 – Demande d'énergie dans le traitement de la canne

| Énergie | Unité | Sucre | Bioéthanol hydraté | Bioéthanol anhydre |
|--|--------|---------|--------------------|--------------------|
| Thermique | | | | |
| Comme vapeur saturée à 1,5 bar (manométrique), pour chauffe-eau, évaporateurs et distillerie | kg/tc | 470-500 | 370-410 | 500-580 |
| Mécanique | | | | |
| Mise en route des systèmes de préparation et de mouture de la canne et motopompes | kWh/tc | 16 | 16 | 16 |
| Électrique | | | | |
| Moteurs électriques divers, illumination et autres charges | kWh/tc | 12 | 12 | 12 |

Source : Pizaia (1998).

Dans le cas de l'agro-industrie du bioéthanol à base de canne, la totalité de l'énergie consommée dans le processus peut être fournie par un système combiné de production de chaleur et de puissance (système de cogénération) installé dans l'usine elle-même, utilisant seulement de la bagasse comme source d'énergie. En effet, de nombreuses usines de sucre de canne dans le monde entier produisent une grande partie de l'énergie dont elles ont besoin. Au Brésil, en particulier, les usines sont auto-suffisantes et, fréquemment, elles réussissent encore à exporter des excédents de plus en plus importants d'énergie électrique vers le réseau public, grâce à l'utilisation croissante d'équipements à meilleur rendement. D'avantage de détails sur la configuration de l'unité de production d'énergie des usines et leurs potentiels de génération sont discutés plus loin, au Chapitre 4.

Quant aux rendements industriels, en général, une tonne de canne utilisée exclusivement pour la production de sucre permet d'obtenir près de 100 kg de sucre et aussi plus de 20 litres de bioéthanol au moyen de la mélasse. Plus spécifiquement pour le contexte brésilien, si nous considérons les valeurs moyennes observées dans environ 60 usines de l'État de São Paulo (valeurs adaptées de CTC, 2005), nous obtenons les données présentées au Tableau 9, sous hypothèse de pertes moyennes et d'une teneur en saccharose de 14%. Sur base de ces valeurs de rendement, dans le cas d'une utilisation exclusive pour la production de

bioéthanol, une tonne de canne permet d'obtenir 86 litres de bioéthanol hydraté, alors que, quand l'objectif est la production de sucre, outre les 100 kg de ce produit, il est encore possible de produire 23 litres de bioéthanol hydraté par tonne de canne, au moyen de la mélasse. Ces dernières valeurs correspondent à un processus de production de sucre avec deux concentrats (processus successifs de cristallisation), dans lequel le miel n'est pas épuisé, et est envoyé relativement riche en saccharose pour la production de bioéthanol, ce qui permet d'améliorer la qualité du produit et de réduire la consommation d'énergie dans la production de sucre. En résumé, les synergies et les complémentarités possibles entre la production de sucre et celle de bioéthanol aident à réduire les coûts et à augmenter l'efficacité des processus agro-industriels.

Tableau 9 – Pertes et rendements moyens des usines de canne

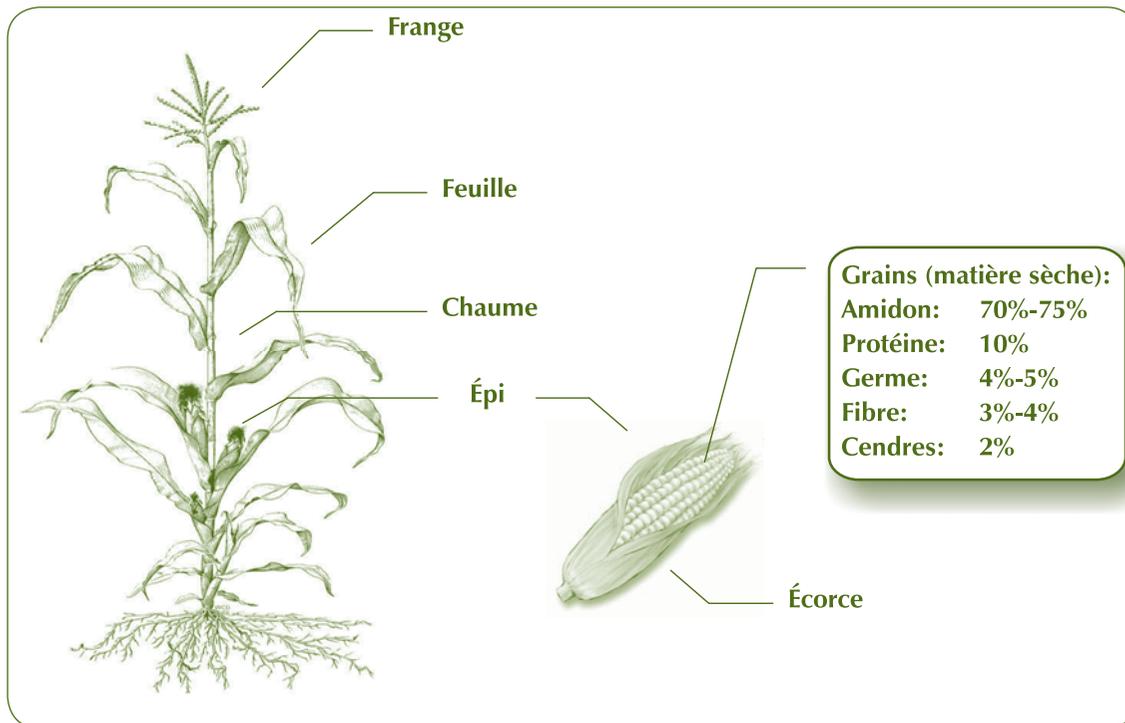
| Item | Perte de sucre ou rendement |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Lavage de la canne | 0,7% |
| Extraction | 3,9% |
| Tourteau filtre | 0,5% |
| Indéterminé | 3,5% |
| Destilação | 0,2% |
| Rendement fermentatif | 90,0% |
| Rendement global | |
| Sucre | 100 kg/t canne (+ 23 litre/t canne) |
| Bioéthanol hydraté | 86 litre/t canne |

Source : Valeurs adaptées de CTC (2005).

3.3 Bioéthanol de maïs

Comme la canne, le maïs (*Zea mays spp.*) est une plante en C4 de la famille des graminées, avec un cycle productif annuel. Originnaire du Mexique, le maïs est cultivé actuellement dans tous les continents et occupe à peu près 147 millions d'hectares, desquels ont été produites près de 725 millions de tonnes en 2004 [Faostat (2008a)], ce qui constitue, dans plusieurs pays, un composant important de l'offre d'aliments pour l'homme et l'animal.

Figure 11 – Structure typique de la biomasse de maïs



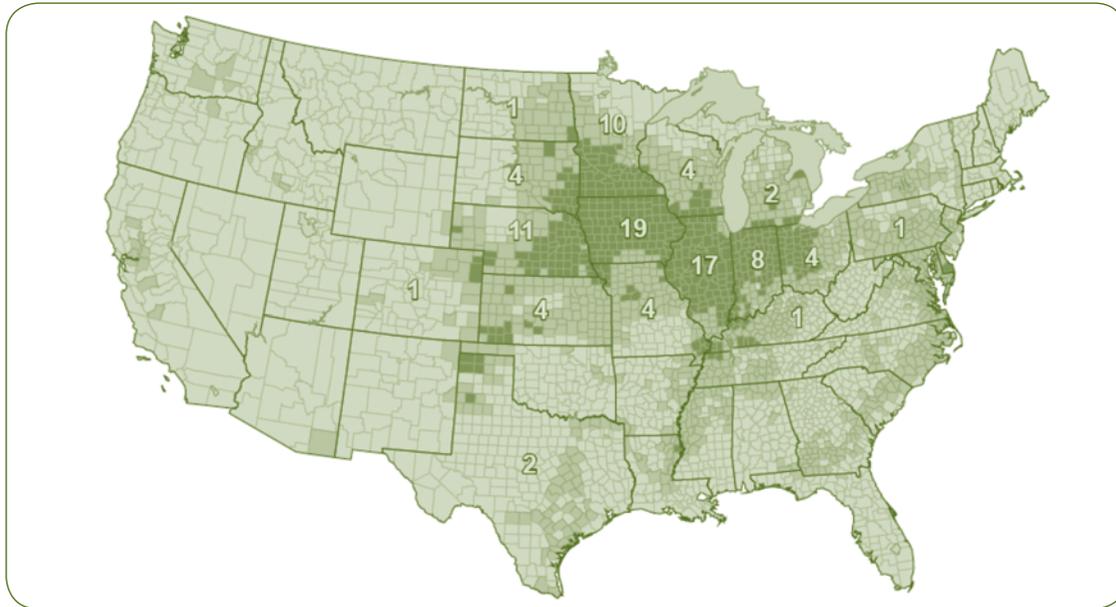
Source : Seabra (2008).

Considérant la production de bioéthanol, il est intéressant de commenter le contexte nord-américain, où le maïs est la matière première responsable de 98% de la production de ce biocarburant. Les États-Unis sont leaders de la production de maïs dans le monde entier, avec presque la moitié du volume produit. En 2006, la production américaine était supérieure à 267 millions de tonnes de grains, pour une surface récoltée d'un peu plus de 28 millions d'hectares [USDA (2008)]. Du total produit, plus de 50% fut destiné à l'alimentation animale, tandis que l'industrie du bioéthanol consomma moins de 20% de la production [Iowa Corn (2008)]. Aux États-Unis, la production se concentre dans la région appelée Ceinture du Maïs, avec une mention spéciale pour les états de Iowa et Illinois, comme indique la Figure 12.

Étant une plante non tolérante au froid, le maïs est planté dans les zones tempérées au printemps, c'est à dire durant les mois d'avril et mai dans l'hémisphère nord. Normalement, le maïs est en rotation de cultures avec une plante qui fixe l'azote, généralement la luzerne ou le soya (dans les régions où les étés sont plus longs), et éventuellement une troisième culture peut être utilisée, comme le blé. Dans le modèle traditionnel, la terre est labourée chaque année, mais l'usage de la culture en semis direct devient une pratique de plus en plus commune. La récolte s'étend du mois de septembre à novembre (automne aux États-Unis), et est réalisée normalement au moyen d'une moissonneuse mécanique. Dans le système méca-

nisé, l'épi est séparé de la tige et les grains sont extraits de l'épi, la paille et les barbes étant laissées déjà sur le terrain.

Figure 12 – Distribution de la production de maïs aux États-Unis*



* Les chiffres sur la carte indiquent la contribution en pourcentage de chaque état.



Récolte du maïs.

La productivité moyenne américaine se situe aux alentours de 9 tonnes de grains par hectare [USDA (2008)]. En réalité, les grains représentent environ 50% de la matière sèche de la plante, qui produit aussi les tiges, les feuilles, les racines et les barbes [Pordesimo et al. (2004)], totalisant près de 15 tonnes de matière sèche par hectare. Bien que cette biomasse puisse être utilisée pour la production d'énergie, il est indispensable qu'une bonne partie reste sur le terrain après la récolte afin de préserver la fertilité du sol [Blanco-Canqui et Lal (2007)].

Comparé à la canne, le maïs requière une quantité significativement plus importante de fertilisants, comme le montre le Tableau 10, avec des résultats pondérés pour les terres avec et sans irrigation [Pimentel et Patzek (2007)]. Quant à l'eau, la demande totale est d'environ 5,6 mil m³ par hectare, bien que moins de 10% de la surface plantée aux États-Unis ait besoin d'irrigation [NGCA (2008)].

Tableau 10 – Demande de fertilisante et phytosanitaires pour la production de maïs aux EUA

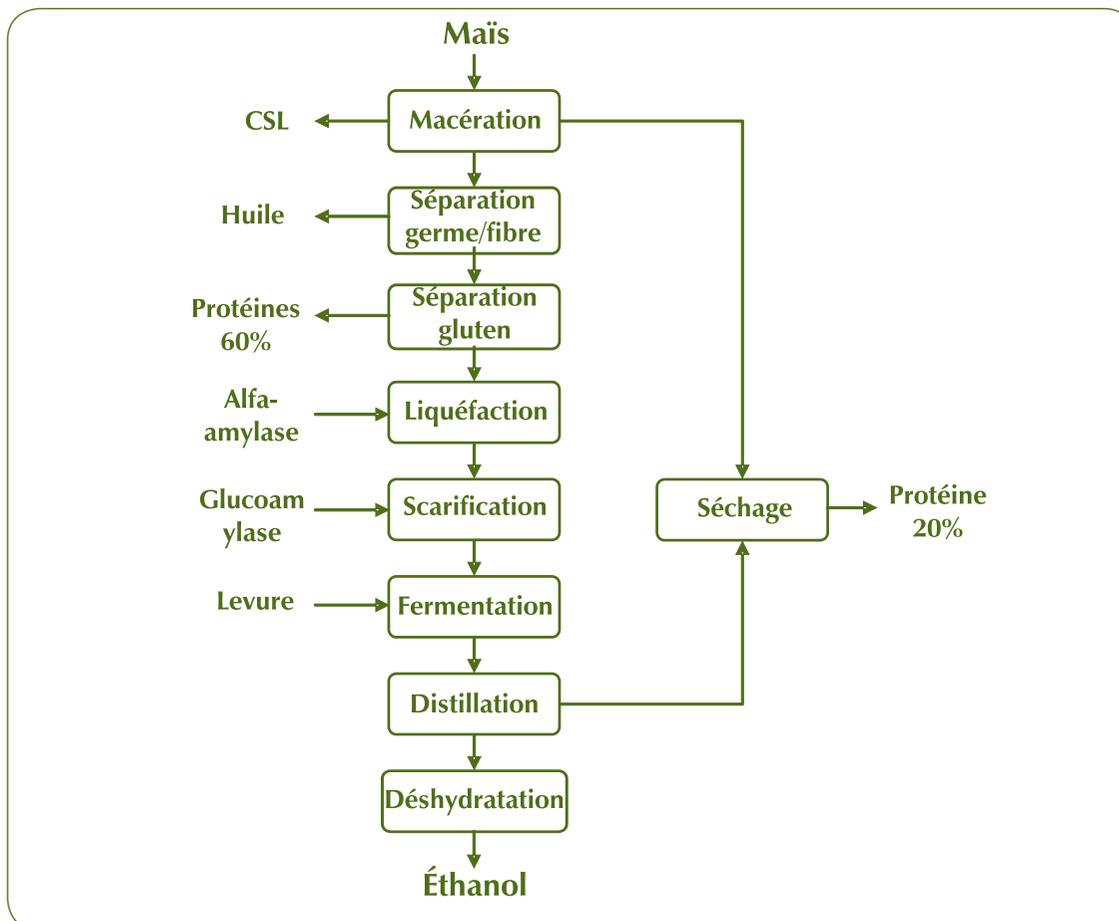
| Intrant | Demande |
|---|-------------|
| Azote | 153 kg/ha |
| Phosphore | 65 kg/ha |
| Potassium | 77 kg/ha |
| Calcaire | 1.120 kg/ha |
| Semences | 21 kg/ha |
| Irrigation (en 10% de la surface plantée) | 8,1 cm/ha |
| Herbicide | 6,2 kg/ha |
| Insecticide | 2,8 kg/ha |

Source : Pimentel et Patzek (2007).

Le bioéthanol peut être produit à partir du maïs à l'aide de deux processus, en adoptant la mouture humide ou sèche. La voie humide était l'option la plus commune jusqu'aux années 1990, mais actuellement, la voie sèche est devenue le processus le plus utilisé pour la production du bioéthanol. Bien qu'il ne permette pas d'obtenir une grande variété de produits, comme dans le cas de la voie humide, les innombrables optimisations apportées à la voie sèche en ont fait une alternative ayant des coûts d'investissement et opérationnels plus bas, réduisant considérablement le coût final du bioéthanol [Novozymes (2002)].

Dans le processus humide, présenté à la Figure 13, les différentes fractions du grain de maïs sont séparées, permettant de récupérer divers produits, comme les protéines, les éléments nutritifs, le gaz carbonique (le CO₂, utilisé dans les fabriques de boissons rafraîchissantes), l'amidon et l'huile de maïs. Tandis que l'huile de maïs est le produit de plus haute valeur, l'amidon (et, par conséquent, le bioéthanol) est celui qui est produit en plus gros volume, avec des rendements proches de 440 litres de bioéthanol par tonne sèche de maïs, comme le montre le Tableau 11.

Figure 13 – Diagramme de flux du processus par voie humide pour la production de bioéthanol à base de maïs



Source : Wyman (1996).

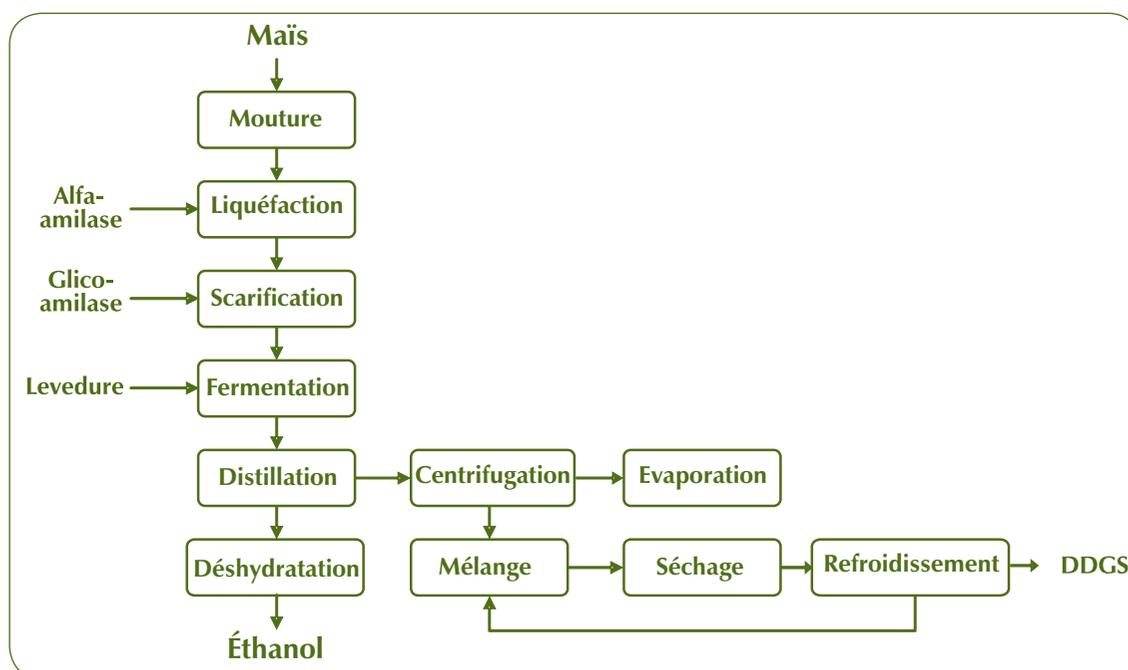
Tableau 11 – Rendements des coproduits dans la voie humide

| Produit | Rendement |
|-----------------|-------------------|
| Huile de maïs | 34–38 kg/t maïs |
| Protéine 20% | 306 kg/t maïs |
| Protéine 60% | 68 kg/t maïs |
| CO ₂ | 308 kg/t maïs |
| Bioéthanol | 440 litros/t maïs |

Source : Wyman (1996).

Dans le cas de la voie sèche, l'unique coproduit du bioéthanol est un supplément protéique pour l'alimentation animale connu comme DDGS (*distillers dried grains with solubles*). Dans ce processus, schématisé à la Figure 14, au grain de maïs moulu est ajouté de l'eau et des enzymes (alfa-amylase), afin de procéder à l'hydrolyse de l'amidon en chaînes de sucre plus courtes. Dans l'étape suivante, ces chaînes sont transformées en sucres par l'action de la glucoamylase et la solution en résultant est mise à fermenter. Dans certaines unités, ces opérations de liquéfaction/production de sucres reçoivent un recyclage d'une partie de la vinasse fine (processus de *backsetting*) en vue de réduire le pH et de fournir des éléments nutritifs pour la fermentation.

Figure 14 – Diagramme de flux du processus de voie sèche pour la production de bioéthanol de maïs



Source : Wyman (1996).

Bien que développant rapidement au début, le processus de libération de sucres perd rapidement de la vitesse, ce qui peut rendre nécessaire de poursuivre les réactions pendant 48 à 72 heures afin d'atteindre une hydrolyse maximale de l'amidon. Pour réduire ce temps et le risque de contamination, de nombreuses unités développent l'hydrolyse et la fermentation de façon simultanée. Dans ce cas, la conversion en glucose est diminuée également, mais, pour les processus qui utilisent le *backsetting*, les sucres non convertis peuvent, grâce au recyclage, avoir une chance d'être mis à profit.

Comme dans le cas du bioéthanol de canne, le glucose est transformé dans la fermentation en bioéthanol par l'action de la levure *Saccharomyces cerevisiae* et le vin produit est envoyé

à la distillation. La vinasse produite dans cette étape poursuit en direction d'un ensemble de centrifugeuses, dans lequel la vinasse fine est séparée et peut être recirculée dans le processus. La partie restante de la vinasse est normalement concentrée dans des évaporateurs, produisant un sirop avec environ 50% d'humidité. Ce sirop est combiné avec les solides retirés de la centrifugeuse et séché jusqu'à atteindre environ 10% d'humidité, donnant naissance au DDGS mentionné antérieurement. Les autres étapes de la distillation sont équivalentes au processus utilisé pour le bioéthanol de canne au Brésil, avec la différence que, aux EUA, la déshydratation à l'aide de membrane moléculaire est déjà le processus le plus utilisé pour la production du bioéthanol anhydre. Quant aux rendements, typiquement, on obtient près de 460 litres de bioéthanol anhydre et 380 kg de DDGS par tonne sèche de maïs [Wyman (1996)].



Unité de production de bioéthanol de maïs aux EUA.

3.4 Bioéthanol à base d'autres matières premières

Comme indiqué au début de ce chapitre, toute matière première ayant une teneur suffisante en sucre ou en amidon peut être convertie en bioéthanol. Ainsi, certains pays utilisent des

cultures comme le manioc, le blé et la betterave sucrière, et il est souvent fait référence aux possibilités des sorghos sucrés. Ces alternatives seront commentées brièvement ci-après.

Le manioc (*Manihot esculenta*) est une plante originaire du Brésil et assez cultivée dans les régions tropicales d'Afrique et d'Asie. Outre sa large utilisation comme aliment de base dans la diète humaine et animale, en Thaïlande et en Chine, le manioc est semi-industrialisé pour être exporté (sous forme de tapioca) et est utilisé localement pour la production d'alcool de boisson. Ses principaux avantages sont de présenter un contenu élevé en amidon dans ses racines, entre 20% et 30%, associé à la rusticité des cultures, à la basse exigence édapho-climatique et à la possibilité de produire presque tout au long de l'année. Ces caractéristiques expliquent les tentatives concrètes d'utilisation du manioc durant la première phase du Pro-alcool, le programme brésilien de bioéthanol, dans les années 1970. Cependant, ces projets n'ont pas été couronnés de succès, principalement à cause du prix élevé du bioéthanol de manioc face à celui du bioéthanol de canne à sucre et des discontinuités dans l'approvisionnement régulier des industries en racines. Au cours des dernières années, principalement dans les pays asiatiques, le manioc a été mis en avant pour la production de bioéthanol combustible [Howeler (2003)] et a été effectivement employé dans des distilleries de Thaïlande [Koisumi (2008)].

Pour la production de bioéthanol, les racines de manioc sont épluchées, lavées et moulues, et passent ensuite aux appareils de cuisson, et successivement, aux réservoirs pour l'hydrolyse de l'amidon, à l'aide de processus similaires à ceux employés pour le bioéthanol de maïs. Avec des indices de productivité industrielle semblables à ceux adoptés pour le maïs, une tonne de manioc *in natura*, avec environ 25% d'amidon, permet de produire 170 litres de bioéthanol. Dans ces conditions, considérant la productivité agricole moyenne de plantations bien entretenues au Brésil, aux alentours de 18 tonnes par hectare [Mandioca Brasileira (2008)], il en résulterait une productivité agro-industrielle de 3.060 litres de bioéthanol par hectare. Outre la vinasse, effluent du processus de distillation, il n'a pas été identifié de coproduits d'une valeur significative dans ce processus [Trindade (1985)]. Malgré son coût plus élevé que celui du manioc, la patate douce pourrait également être traitée de façon similaire, et elle a été testée comme matière première pour la fabrication de bioéthanol, avec des résultats limités.

Le blé (*Triticum spp.*), une autre culture qui fournit de l'amidon, a été employé effectivement au cours de ces dernières années, pour la production de bioéthanol dans certains pays européens, comme l'Angleterre et l'Allemagne, moyennant un processus industriel assez similaire à celui utilisé pour le maïs. Dans ce cas, la productivité agricole et la productivité industrielle typiques sont, respectivement, de 7,5 tonnes par hectare et de 240 litres de bioéthanol par tonne de grains traités [LowCVP (2004)], le résultat étant une production de 1.800 litres par hectare cultivé. Tout comme le maïs, près de 320 kg de coproduits de valeur pour l'alimentation animale sont obtenus pour chaque tonne de blé traité. Assez semblables au blé, les cultures de l'orge et du seigle ont été adoptées également, à petite échelle, pour la production de bioéthanol combustible dans certains pays d'Europe.

Parmi les cultures qui produisent directement du sucre, outre la canne, la betterave sucrière (*Beta vulgaris*) a été utilisée pour la fabrication du bioéthanol, en employant le miel résiduel (mélasse) toujours disponible dans la production industrielle de saccharose [Tereos (2006)]. Ce légume a une racine tubéreuse, dans laquelle s'accumulent des quantités élevées de sucre, présentant une productivité de 50 à 100 tonnes par hectare et des teneurs en saccharose de l'ordre de 18% [RIRDC (2007)]. Les indices de productivité agro-industriels atteints sont assez élevés, de l'ordre de 7.500 litres de bioéthanol par hectare cultivé, similaires à ceux de la canne. Le traitement industriel de la betterave débute par le nettoyage et par le fractionnement en fines tranches, acheminées ensuite dans un diffuseur où elles sont successivement lavées à l'eau chaude et libèrent leur sucre. Le liquide résultant de cette opération contient environ 16% de solides solubles extraits de la betterave, et est alors traité de forme analogue au jus de canne, pour le sucre ou pour le bioéthanol. À partir d'une tonne de tubercules sont produits typiquement 86 litres de bioéthanol et 51 kg d'une tourte fibreuse, qui peut être utilisée pour l'alimentation animale [El Sayed et al. (2005)]. Il faut noter que, bien qu'elle présente une productivité élevée, la betterave dépend de l'énergie externe (électricité et combustible) pour son traitement.

Bien qu'il n'existe pas encore de production significative de bioéthanol à base de sorgho sucré (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), cette culture a été proposée fréquemment comme une source potentielle de matière première. En particulier, l'utilisation du sorgho dans la fabrication de bioéthanol pourrait être éventuellement intégrée à l'agro-industrie, en allongeant la période usuelle de récolte au moyen d'une culture relativement plus rustique que la canne et permettant diverses similitudes quant au traitement. Les tiges de sorgho peuvent être traitées dans des pressoirs, produisant un jus sucré avec un contenu en saccharose inférieur au jus de canne et qui peut, à son tour, être soumis à un processus industriel similaire pour produire des miels et du bioéthanol.

Avec une productivité industrielle de 40 litres de bioéthanol par tonne de sorgho traité [Icrisat (2004)] et des valeurs de productivité agricole de 50 tonnes par hectare, observées en des terres plantées avec le cultivar BR 505 développé par l'Entreprise Brésilienne de Recherche en Agriculture et Élevage (Embrapa) au Centre National de Recherche de Maïs et de Sorgho dans le but d'une production de bioéthanol [Teixeira et al. (1997)], la productivité agro-industrielle obtenue est de 2.500 litres de bioéthanol par hectare. Cependant, l'emploi du sorgho présente encore des difficultés qui doivent être surmontées avant son adoption effective, principalement sa conservation limitée après la récolte, la base limitée de germoplasme, la faible adaptabilité environnementale et la basse résistance aux déprédateurs et aux maladies [Venturi et Venturi (2003)]. En effet, des expérimentations avec du sorgho dans des usines de la région de São Paulo, même en association avec la canne, n'ont pas donné de résultats motivants [Leal (2008)].

Vu la viabilisation possible, à moyen terme, de solutions innovatrices pour la production de bioéthanol, spécialement au moyen de l'hydrolyse de matériaux cellulosiques, outre les espèces de sylviculture comme l'eucalyptus et quelques légumineuses arbustives (en parti-

culier, *Leucaena spp.*), il est observé un intérêt grandissant pour les graminées à croissance rapide et d'une productivité élevée, comme l'herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*), utilisée normalement comme plante fourragère au Brésil, le switchgrass (*Panicum virgatum*), espèce native d'Amérique du Nord qui pourraient produire diverses coupes annuelles, ainsi que les plantes herbacées hautes du type *Miscanthus*, particulièrement étudiées en Europe comme source de biomasse cellulosique.

Dans la sélection d'une culture comme source de matière première pour la fabrication de bioéthanol, il est impératif de prendre en considération les exigences préalables d'efficacité, au sens large. Ainsi, il convient d'accorder la priorité aux cultures qui réduisent au minimum les nécessités en terre, en eau et en apports externes de produits agrochimiques, entre autres aspects. En outre, la viabilité économique doit être prise en considération, car cela aurait peu de sens de proposer l'utilisation de cultures nobles et de bonne valeur de marché comme source de bioénergie. La matière première représente, typiquement, de 60% à 70% du coût final du bioéthanol et la recherche d'alternatives de bas coût est fondamentale. L'existence de coproduits et de sous-produits à valeur alimentaire, industrielle ou énergétique, est également importante, dans la mesure où elle peut conférer une flexibilité souhaitable à la production bioénergétique, en associant la disponibilité de biocarburants à d'autres produits à valeur économique.

Un autre point absolument important pour la sélection adéquate de biomasses dotées d'un potentiel pour la production de bioéthanol est le bilan énergétique de chacune d'elles, c'est-à-dire, le rapport entre l'énergie produite et la demande d'énergie directe et indirecte pour produire une telle énergie. Les cultures ayant une productivité élevée et une faible demande en intrants énergétiques exogènes sont plus intéressantes. Ce sujet sera traité au prochain paragraphe.

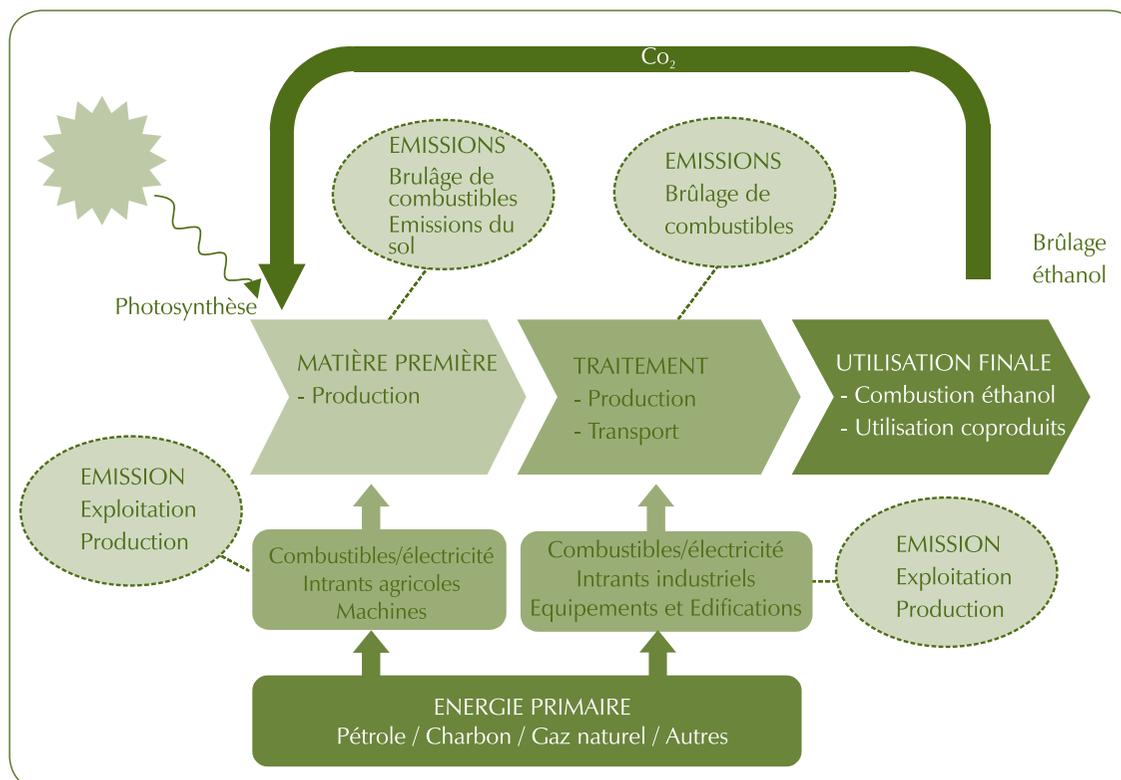
Ainsi, malgré les perspectives intéressantes de certaines cultures non conventionnelles pour la production de bioéthanol, il est important de voir clairement leur caractère nouveau et la nécessité d'études agronomiques plus détaillées afin d'avoir la certitude que leur emploi à grande échelle peut être recommandé, dans une bonne partie des alternatives. En dépit de la nécessaire prudence, une diversification de l'offre de matière première pour la production de bioéthanol pourra s'effectuer, au fur et à mesure du progrès de la connaissance sur ces cultures, sur des bases consistantes et durables, éventuellement dans des créneaux d'intérêt particuliers comme par exemple les cultures en sols salins et peu exigeantes en eau. Dans n'importe lequel de ces scénarios, il faut rappeler que la production de bioéthanol ne peut être considérée comme un substitut à la production agricole actuelle, mais fondamentalement comme une nouvelle activité, destinée à utiliser les terres marginales dans un processus d'expansion et de diversification des pratiques agricoles.

3.5 Productivité, émissions et bilans énergétiques

Indépendamment de la biomasse utilisée pour sa production, le principal objectif de l'utilisation du bioéthanol comme combustible est la substitution des dérivés du pétrole,

permettant de diminuer la dépendance à l'égard de ces ressources fossiles et d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre (GEE). Cependant, la mesure avec laquelle un biocarburant peut-il substituer un combustible fossile dépend essentiellement de la manière dont il est produit. Comme toutes les technologies de production supposent (directement ou indirectement) l'utilisation de ressources fossiles, le bénéfice associé à l'utilisation d'un biocarburant dépend de l'économie effective d'énergie non renouvelable qu'il procure en comparaison avec son équivalent fossile. Pour un calcul adéquat des énergies intervenant dans le processus de production agro-industriel, il faut prendre en considération les émissions de GEE associées à son cycle de vie, et qui sont le résultat, non seulement de la consommation des combustibles fossiles (par exemple, les tracteurs dans les opérations agricoles), mais des émissions provenant d'autres effets (par exemple, dans la production et l'utilisation de fertilisants), conformément au schéma de la Figure 15.

Figure 15 – Diagramme du cycle de vie d'un biocarburant



Source : Seabra (2008).

Comme on peut l'observer à la Figure 15, les frontières du système à analyser peuvent changer selon la conduite de l'étude, mais en général, les analyses de cycle de vie visent à déterminer les dépenses d'énergie et les émissions de GEE depuis la production de matière première jusqu'à l'utilisation finale du combustible. Il faut prendre également en considé-

ration les consommations d'énergie et les émissions associées à la production des intrants et des équipements utilisés dans la chaîne productive du biocarburant. Il est important de noter que, en principe, tout le CO₂ libéré dans la combustion de produits de la biomasse est recyclé au moyen de la photosynthèse dans la croissance de la biomasse au prochain cycle productif, mais la parcelle correspondant aux combustibles fossiles consommés dans la production du bioéthanol représente une augmentation de la quantité de ces gaz dans l'atmosphère.

Récemment, ont surgi quelques mises en question sur l'impact dans les émissions de GEE du changement de l'utilisation de la terre affectée à la production de matière première pour les biocarburants. Il a été affirmé que, suivant le type de végétation antérieure sur le terrain utilisé pour la production du biocarburant, la perturbation provoquée par le changement de l'utilisation du sol pourrait libérer dans l'atmosphère une quantité de carbone, qui était auparavant « emprisonnée » dans la végétation et dans le sol, quantité suffisamment élevée pour remettre en question son bénéfice environnemental. Cette question, cependant, fait encore l'objet de controverses, fondamentalement par le fait que la disponibilité de données mesurées sur cet effet n'est pas encore suffisante pour tirer des conclusions.

De toute manière, ceci est un domaine qui mérite attention et des études plus poussées sont nécessaires pour estimer de manière plus consistante la contribution réelle de ces émissions dans le cycle de vie des biocarburants. Cependant, du moins dans le cas brésilien, il est peu probable que des pertes de couverture forestière puissent être associées à la production de bioéthanol, étant donné que l'expansion de la culture de la canne à sucre s'est déroulée, basiquement, sur des terres occupées auparavant par des pâturages de basse productivité ou des cultures annuelles destinées en grande partie à l'exportation, comme le soja, activités comportant une séquestration de carbone moins élevée que celle résultant de la culture de la canne à sucre. Un autre aspect dont il faut tenir compte est l'effet de l'augmentation de la récolte de canne à sucre sans brûlis, avec une plus grande quantité de paille, et donc, de carbone, incorporée au sol.

Sans vouloir explorer cette question, diverses études ont déjà été réalisées dans le but d'évaluer les impacts énergétiques et environnementaux des biocarburants. Dans le cas de la canne, en considérant la substitution de l'essence et l'atténuation des émissions de GEE, les avantages environnementaux du bioéthanol au Brésil ont été établis depuis déjà pas mal de temps, dès la divulgation des premiers travaux plus détaillés sur ce thème [Macedo et Horta Nogueira (1985) et Macedo (1992)]. Depuis lors, des études d'actualisation ont été publiées [Macedo (1998) et Macedo et al. (2004)], en intégrant l'évolution des pratiques agro-industrielles dans le secteur du sucre et de l'alcool et les progrès de la connaissance sur les aspects environnementaux.

La dernière évaluation publiée analysait les bilans d'énergie et les émissions de GEE pour la situation actuelle et en fonction d'un scénario pour 2020, du point de vue global « de la plantation de la canne au portail de l'usine » [Macedo et al. (2008)]. Sur base des moyennes des principaux paramètres agricoles et industriels de 44 usines dans la Région Centre-Sud

du Brésil, cette étude indique qu'actuellement, pour chaque unité d'énergie fossile utilisée dans la production du bioéthanol de canne, plus de neuf unités d'énergie renouvelable sont produites, sous la forme de bioéthanol et d'excédents d'énergie électrique et de bagasse, comme le montre le Tableau 12. Il est intéressant de noter que, même en considérant l'augmentation de la mécanisation et l'utilisation de technologies agricoles qui doivent élever la demande énergétique de 12% dans cette période de 15 ans, la croissance de la production de bioéthanol par tonne de canne traitée et, principalement, l'augmentation significative de la production d'énergie électrique devront permettre à agro-industrie de la canne à sucre de demeurer la forme la plus efficiente de production de biocarburants et, en des proportions croissantes, de bioélectricité, avec un espoir que le rapport d'énergie produite/énergie consommée atteigne des niveaux supérieurs à 11. Ces estimations se sont basées sur des excédents d'énergie électrique de 9,2 kWh et 135 kWh, par tonne de canne et des coefficients thermiques dans les systèmes de cogénération de 9 MJ/kWh et 7,2 MJ/kWh, respectivement pour 2005/2006 et 2020. Ces chiffres sont compatibles avec les technologies disponibles, et en développement, qui considèrent, dans ce dernier cas, l'utilisation de la paille de canne à sucre (40% de récupération) comme un combustible supplémentaire à la bagasse, dans les systèmes avec turbines d'extraction-condensation à haute pression et des processus avec une consommation réduite de vapeur (340 kg de vapeur par tonne de canne traitée) [Macedo et al. (2008)].

Tableau 12 – Bilan d'énergie dans la production de bioéthanol de canne (MJ/tc)

| Composant du bilan énergétique | 2005/2006 | Scénario 2020 |
|--|-----------|---------------|
| Production et transport de canne | 210,2 | 238,0 |
| Production du bioéthanol | 23,6 | 24,0 |
| <i>Input</i> fossile (total) | 233,8 | 262,0 |
| Bioéthanol | 1.926,0 | 2.060,0 |
| Excédent de bagasse | 176,0 | 0,0 |
| Excédent d'électricité | 82,8 | 972,0 |
| <i>Output</i> renouvelable (total) | 2.185,0 | 3.032,0 |
| Production/consommation énergétique | | |
| Bioéthanol + bagasse | 9,0 | 7,9 |
| Bioéthanol + bagasse + électricité | 9,3 | 11,6 |

Source : Macedo et al. (2008).

En termes d'émissions de gaz à effet de serre, actuellement la production de bioéthanol de canne à sucre provoque une émission de presque 440 kg CO₂eq/m³ de bioéthanol, avec des perspectives d'une certaine réduction au cours des années à venir, comme le montre le Tableau 13. Cependant, en considérant son utilisation dans des mélanges d'essence, avec des teneurs de 25%, comme c'est le cas au Brésil, associé aux effets dus à l'utilisation de la bagasse et aux excédents d'électricité, l'émission nette évitée, résultant de la différence entre les émissions dans la production et les émissions évitées, atteint 1.900 kg CO₂eq/m³ de bioéthanol, dans les conditions actuelles. Et il est possible qu'elle atteigne des niveaux supérieurs à 2.260 kg CO₂eq/m³ de bioéthanol, dans les conditions attendues pour 2020,

comme le montre le Tableau 14. Ceci est dû au fait que, lorsque l'essence est remplacée par le bioéthanol, toute l'émission associée à l'utilisation du combustible fossile est compensée, laissant à comptabiliser seulement les émissions en rapport avec le bioéthanol, qui à son tour, dépendent de l'efficacité lors de l'utilisation finale de ce biocarburant. Pour ces évaluations, le principe utilisé est que la bagasse excédente doit substituer le fuel combustible dans les chaudières et que l'énergie électrique produite par l'agro-industrie du bioéthanol remplace l'énergie électrique produite classiquement, production considérée selon les facteurs d'émission moyens mondiaux (579 et 560 t CO₂eq/GWh pour 2005 et 2020, respectivement) [Macedo et al. (2008)].

Tableau 13 – Emissions dans la production du bioéthanol de canne (kg CO₂eq/m³)

| | 2005/2006 | | Scénario 2020 | |
|-----------------------|-----------|---------|---------------|---------|
| | Hydraté | Anhydre | Hydraté | Anhydre |
| Bioéthanol | | | | |
| Emission totale | 417 | 436 | 330 | 345 |
| Combustibles fossiles | 201 | 210 | 210 | 219 |
| Brûlis | 80 | 84 | 0 | 0 |
| Sol | 136 | 143 | 120 | 126 |

Source : Macedo et al. (2008).

Tableau 14 – Emissions nettes de la production et de l'utilisation du bioéthanol de canne (kg CO₂eq/m³)

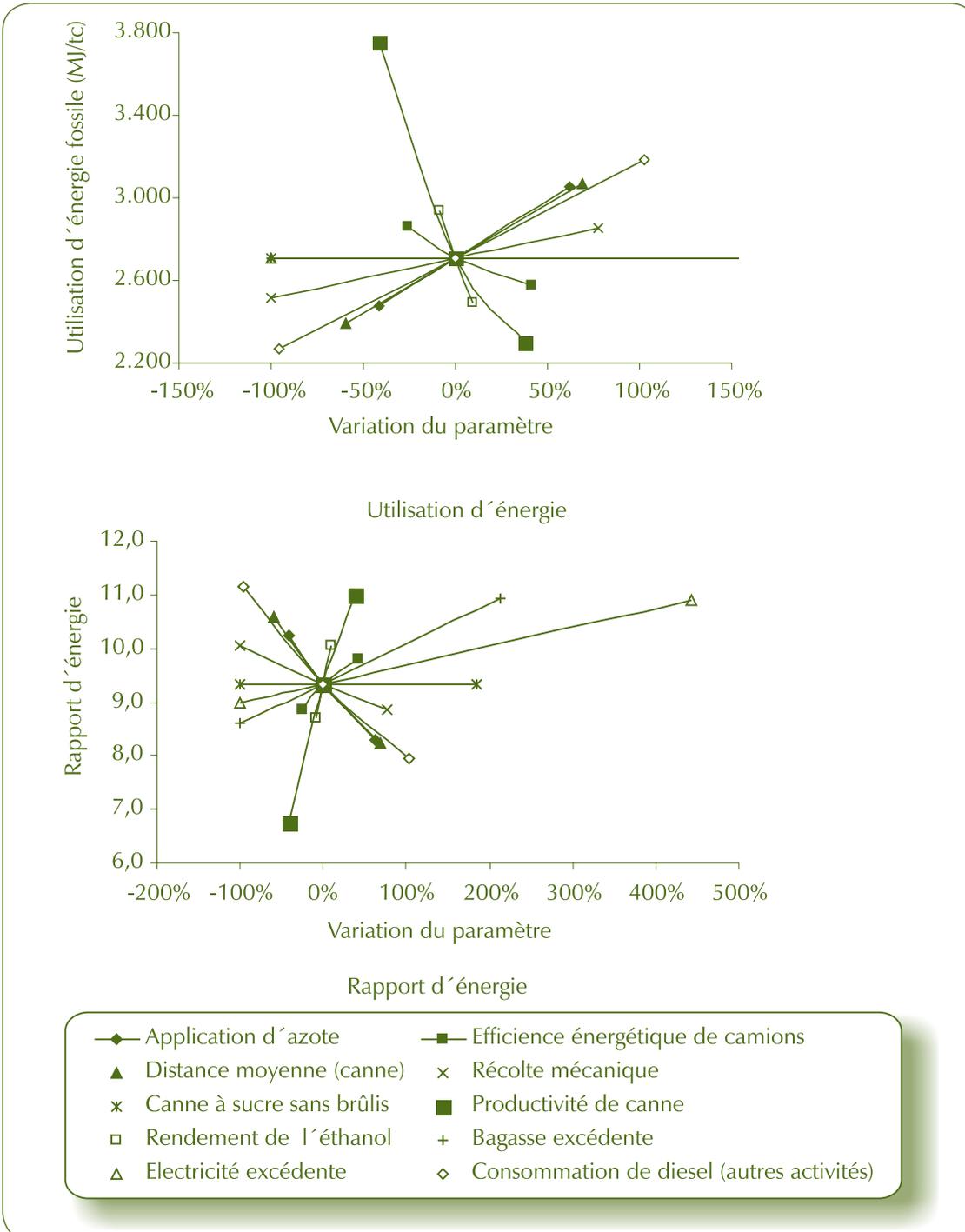
| | 2005/2006 | | Scénario 2020 | | |
|--------------------------------------|-----------|--------|---------------|-----------|--------|
| | E100 | E25 | E100 | E100-FFV* | E25 |
| Forme d'utilisation du bioéthanol | | | | | |
| Emissions évitées | 2.181 | 2.323 | 2.763 | 2.589 | 2.930 |
| Utilisation de la biomasse excédente | 143 | 150 | 0 | 0 | 0 |
| Excédent d'électricité | 59 | 62 | 784 | 784 | 819 |
| Utilisation du bioéthanol | 1.979 | 2.111 | 1.979 | 1.805 | 2.111 |
| Emissions nettes | -1.764 | -1.886 | -2.433 | -2.259 | -2.585 |

Source : Macedo et al. (2008).

* FFV : véhicules flexibles

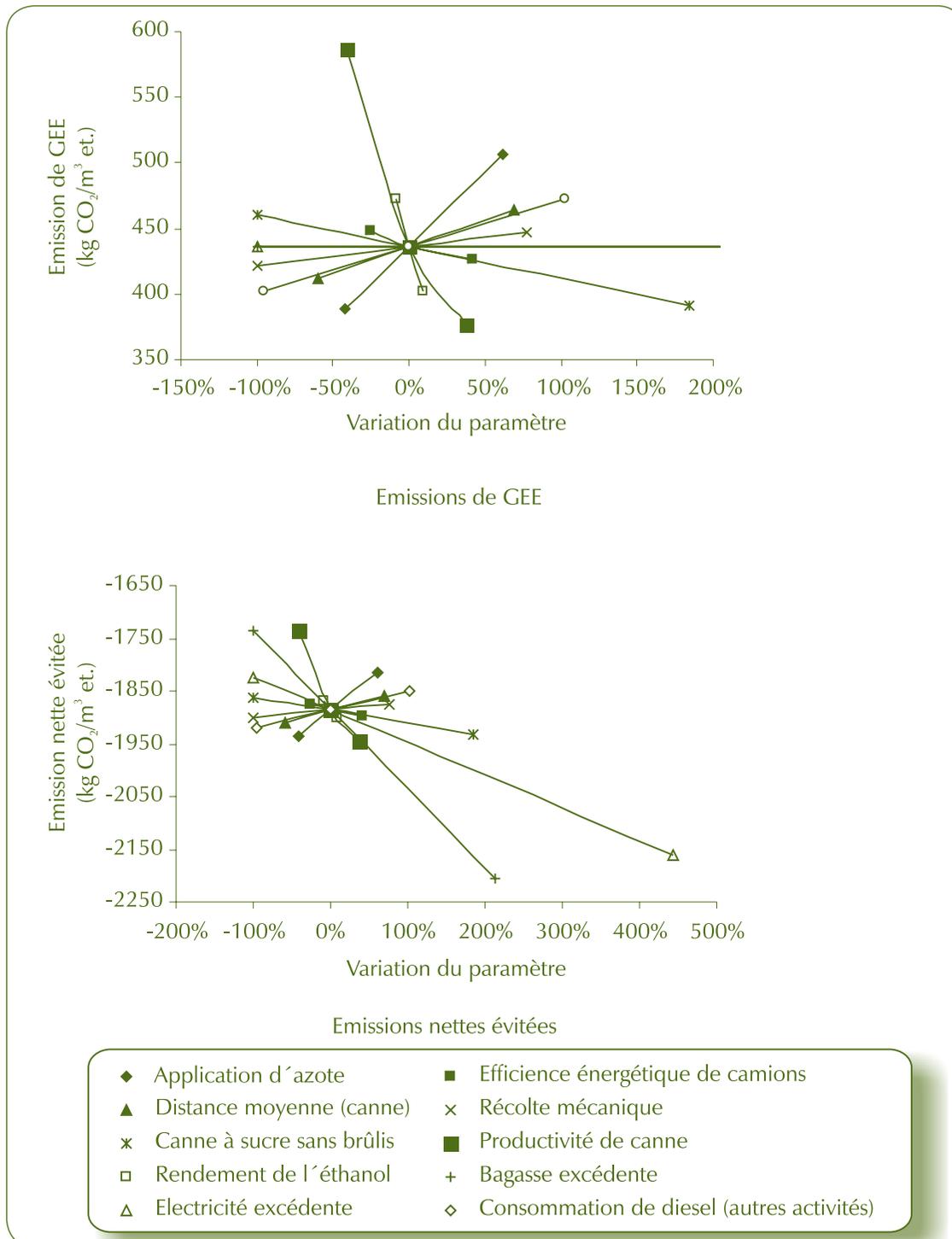
Rappelons que ces résultats se basent sur les conditions moyennes de l'échantillon d'usines du Centre-Sud brésilien, dans lequel peuvent se présenter des variations des bilans énergétiques en fonction de la manière dont sont considérés les paramètres agricoles et industriels individuels de chaque usine. La Figure 16 illustre l'influence individuelle de la variation de ces paramètres sur l'utilisation de l'énergie dans les usines et sur le rapport de l'énergie (énergie produite/énergie consommée), tandis que la Figure 17 présente la sensibilité des émissions de GEE et des émissions nettes de GEE, en considérant les intervalles de variation constatés pour cet échantillon d'usines. A l'intérieur de telles limites, ces résultats peuvent être considérés comme caractéristiques de l'agro-industrie énergétique basée sur la canne à sucre, avec de bons indicateurs de rendement, comme celle pratiquée en divers pays tropicaux au climat favorable à cette culture.

Figure 16 – Analyse de sensibilité pour l'utilisation et rapport d'énergie pour le bioéthanol de canne à sucre dans le scénario actuel (2005/2006)



Source : Macedo et al. (2008)

Figure 17 – Analyse de sensibilité pour les émissions de GEE pour le bioéthanol de canne à sucre dans le scénario actuel (2005/2006)



Source : Macedo et al. (2008).

Actuellement, la production du bioéthanol à base de sucre de canne est déjà une technologie mûre, et il n'y a pas beaucoup de marge pour de grandes augmentations de rendement, en particulier dans la phase industrielle. Cependant, pour la production de bioéthanol à base de matériaux lignocellulosiques issus de la canne, comme la bagasse et la paille, les perspectives sont différentes. Actuellement, la tendance la plus claire est une transformation des usines en unités productrices non seulement de sucre et de bioéthanol, mais aussi de volumes significatifs d'électricité, une forme d'énergie qui offre une qualité et une valeur économique supérieures à celles des combustibles, par unité d'énergie produite. Les options de cogénération les plus avancées, associées à des configurations de processus avec une demande d'énergie moindre, permettent déjà de rendre cela possible. Et dans un avenir proche, une partie significative de la paille pourra être ajoutée comme combustible supplémentaire à la bagasse, rendant possible la production d'énergie électrique à des niveaux encore plus élevés et produisant des excédents d'énergie électrique plus importants, supérieurs à 100 kWh par tonne de canne traitée. En ayant cela à l'esprit, il est raisonnable d'espérer qu'à l'horizon de 2020 le rapport d'énergie renouvelable produite / énergie fossile consommée pour le bioéthanol de canne sera proche de 12, avec des émissions nettes évitées d'environ 2.600 kg CO₂eq/m³ de bioéthanol [Macedo et al. (2008)].

Contrairement au cas du bioéthanol de canne, il existe encore une controverse sur les bénéfices environnementaux de la substitution d'essence par du bioéthanol de maïs. Quelque soit le calcul et sans aucun doute, dans le meilleur des cas, le bénéfice est nettement inférieur à celui obtenu par le bioéthanol de la canne. Ceci est dû au fait que, bien que le traitement du maïs pour produire du bioéthanol requière une quantité d'énergie significativement moindre que la canne pour sa conversion en bioéthanol, dans le cas du maïs, toute l'énergie provient de sources fossiles. La vapeur nécessaire (10,6 MJ/litre) est produite dans des chaudières au gaz naturel, et l'électricité (0,4 kWh/litre) est fournie par le réseau public, qui aux EUA est très dépendant des énergies fossiles [Pimentel et Patzek (2005)].

Dans un travail comparatif réalisé récemment [EBAMM (2005)], diverses études furent analysées, menant à la conclusion que le rapport d'énergie le plus représentatif pour le bioéthanol de maïs dans les conditions américaines serait de 1,3 en prenant en considération déjà les crédits pour les coproduits, tels que le DDGS. Dans le cas des émissions, la production du bioéthanol de maïs entraîne une émission totale de près de 1.700 kg CO₂eq/m³ de bioéthanol (en considérant également les crédits des coproduits), ce qui équivaldrait à une émission nette évitée de 130 kg CO₂eq/m³ de bioéthanol, en considérant son utilisation finale (cf Tableau 15). Ce chiffre est presque 15 fois inférieur à celui observé dans le cas du bioéthanol de canne.

Comme dans le cas du bioéthanol de canne, la production de bioéthanol à base de maïs est également une technologie mature. Son cependant attendus des progrès prochains dans la recherche d'un meilleur rendement environnemental pour le bioéthanol de maïs, en se concentrant sur l'utilisation de la biomasse restante (paille), comme combustible ou comme intrant pour étendre la production de bioéthanol, probablement au moyen de l'hydrolyse.

Cependant, il faut souligner que les limites pour la mise à profit de cette biomasse sont contraignantes, étant donné sa grande importance pour la préservation de la qualité du sol.

Tableau 15 – Bilan d'énergie et émissions de GEE pour le bioéthanol de maïs aux EUA

| Flux d'énergie | Valeur |
|---|---|
| Consommation dans la phase agricole | 5,59 MJ/litre |
| Consommation dans la phase industrielle | 15,24 MJ/litre |
| Consommation totale | 20,83 MJ/litre |
| Production de bioéthanol | 21,20 MJ/litre |
| Valeur énergétique des coproduits | 4,13 MJ/litre |
| Output total | 25,33 MJ/litre |
| Rapport d'énergie (production/consommation) | 1,2 |
| Balance des émissions | |
| Phase agricole | 868 kg CO ₂ eq/m ³ |
| Phase industrielle | 1353 kg CO ₂ eq/m ³ |
| Coproduits | -525 kg CO ₂ eq/m ³ |
| Emission dans la production de bioéthanol | 1696 kg CO ₂ eq/m ³ |
| Emissions du bioéthanol | 81 g CO ₂ eq/MJ |
| Emissions de l'essence | 94 g CO ₂ eq/MJ |
| Emissions nettes | 134 kg CO ₂ eq/m ³ |

Source : Farrell et al. (2006) et EBAMM (2005).

Pour les deux autres options de biomasse pour la production de bioéthanol, la situation n'est pas très différente, du moins en ce qui concerne les cas de la betterave, du blé et du manioc, comme le montre le Tableau 16, dans lequel les valeurs du rapport d'énergie et des émissions évitées sont très modestes [Dai et al. (2006), EBAMM (2005), IEA (2004), Macedo et al. (2007) et Nguyen et al. (2007)]. Rappelons l'importance de ces paramètres : le rapport d'énergie représente l'énergie renouvelable produite dans la chaîne productive du biocarburant, divisé par la quantité d'énergie non-renouvelable requise pour sa production, et les émissions évitées dans ce tableau correspondent à la réduction en pourcentage des émissions par rapport aux émissions du cycle de vie de l'essence, en indiquant, respectivement, la cohérence énergétique et environnementale de chaque solution technologique pour la production de bioéthanol.

En raison de ces résultats, outre la canne, qui a déjà démontré largement ses avantages énergétiques et environnementaux comme source de bioénergie et, en particulier, de bioéthanol, à moyen et à long terme, l'espoir repose effectivement aussi dans la production de biocarburant à base de matériaux lignocellulosiques, en ayant en vue aussi bien les critères environnementaux que le potentiel de production. Cependant, il ne s'agit pas d'une technologie

développée à échelle commerciale et de nombreux efforts de recherche et de démonstration sont encore nécessaires pour que cette possibilité devienne une option réellement viable à l'avenir. Ce thème sera repris plus loin.

Tableau 16 – Comparaison des différentes matières premières pour la production de bioéthanol

| Matière première | Rapport d'énergie | Emissions évitées |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| Cane | 9,3 | 89% |
| Maïs | 0,6 – 2,0 | -30% a 38% |
| Blé | 0,97 – 1,11 | 19% a 47% |
| Betterrave | 1,2 – 1,8 | 35% a 56% |
| Manioc | 1,6 – 1,7 | 63% |
| Résidus lignocellulosiques* | 8,3 – 8,4 | 66% a 73% |

Source : Elaboré sur base de Dai et al. (2006), EBAMM (2005), IEA (2004), Macedo et al. (2007) e Nguyen et al. (2007).

*Estimation théorique, processus en développement

Ainsi, il est possible que la réduction des émissions de gaz à effet de serre soit l'un des effets positifs les plus importants associés au bioéthanol de canne à sucre. Conformément au Communiqué Brésilien à la Convention-Cadre des Nations Unies pour le Changement du Climat, avec des valeurs de 1994, l'utilisation de l'énergie de la canne a réduit de 13% les émissions de carbone de tout le secteur énergétique. Pour les volumes de production de cette agro-industrie au Brésil, en 2003, la substitution de l'essence par le bioéthanol et la production d'énergie au moyen de la bagasse, ont réduit les émissions de CO₂ dans des quantités équivalentes, respectivement, à 27,5 millions et 5,7 millions de tonnes [Goldemberg et al. (2008)]. Comme référence pour les calculs en des situations semblables, chaque centaine de millions de tonnes de canne destinées à des fins énergétiques permet d'éviter l'émission de 12,6 millions de tonnes de CO₂ équivalentes, en prenant en considération le bioéthanol, la bagasse et l'excédent additionnel d'énergie électrique repassé au réseau [Unica (2007)].



Chapitre 4

Coproduits du bioéthanol de canne à sucre

Outre le bioéthanol, l'agro-industrie de la canne à sucre produit une gamme croissante d'autres produits, finalisés ou servant de matières premières intermédiaires, qui augmentent sa rentabilité économique et permettent, moyennant d'intéressantes synergies, d'ajouter une valeur au processus d'ensemble. Parmi ces produits, se distinguent naturellement le sucre (en vérité, le produit historique et traditionnel de cette industrie) et, ces dernières années, l'énergie électrique. Produite dans des systèmes de cogénération depuis des décennies, cette électricité est actuellement en augmentation, fournissant des excédents, transférés dans le réseau public, qui ont une importance croissante dans le résultat économique de l'agro-industrie et dans l'offre globale d'électricité dans de nombreux pays, comme le Brésil. Dans ce chapitre, seront commentés les processus de fabrication des autres produits de la canne qui sont déjà commercialisés et dont la technologie est développée, réservant pour le prochain chapitre l'analyse des nouvelles possibilités, encore en développement ou en début de commercialisation.

4.1 Sucre et dérivés

Composant de base de la diète humaine moderne, le sucre est constitué essentiellement de saccharose. Il fut introduit dans le monde occidental par les arabes, durant le Moyen Âge, comme une épice de grande valeur. Le sucre de canne commença à être produit par le Portugal à partir de ses colonies de l'océan Atlantique. Avec l'ample expansion de la culture de la canne à sucre dans le Nouveau Monde, il s'est transformé d'un produit dont l'usage était restreint à la consommation des élites à une marchandise employée largement dans le monde entier. Le sucre fut très important pour la formation de l'économie brésilienne, plus que l'or ou que n'importe quel autre produit, et, comme le rapportent les maîtres Gilberto Freyre et Câmara Cascudo, il contribua au moule de la société et de la personnalité du brésilien. Cette importance se constate aussi dans beaucoup d'autres pays où l'agro-industrie de la canne fut et est toujours un élément central de l'activité économique.

Plus de 130 pays produisent actuellement, du sucre, avec une production mondiale de 164,5 millions de tonnes pour la campagne 2006/2007. Près de 78% de ce total est produit à partir de la canne à sucre, cultivée principalement dans des régions tropicales et sub-tropicales de l'hémisphère sud, et le restant, en utilisant la betterave à sucre cultivée surtout dans les zones tempérées de l'hémisphère nord. Comme les coûts de production du sucre de canne sont inférieurs aux coûts du sucre de betterave, la fraction produite par les pays en développement ne fait qu'augmenter, dans la mesure où tombent les barrières commerciales qui empêchent le libre commerce de ce produit. Ainsi, ces pays devront être les responsables de pratiquement toute la croissance future de la production, en augmentant leur participation dans l'offre mondiale de sucre, de 67% en 2000 à 72% en 2010. Le Tableau 17 présente les principaux producteurs et exportateurs mondiaux de sucre, pour la campagne 2006/2007 [Illovo (2008)].

Tableau 17 – Principaux pays producteurs et exportateurs de sucre pour la campagne 2006/2007*

| Pays | Production (million de ton) | Exportation (million de ton) |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Brésil | 33.591 | 22.200 |
| Inde | 27.174 | 1.341 |
| Union Européenne | 16.762 | 1.228 |
| Chine | 11.630 | – |
| États-Unis d'Amérique | 7.661 | – |
| Thaïlande | 7.011 | 4.528 |
| Mexique | 5.543 | 380 |
| Afrique du Sud | 5.419 | 2.339 |
| Australie | 5.156 | 3.958 |
| Pakistan | 3.813 | – |

Source : Illovo (2008).

*Valeurs préliminaires.

Pour cette campagne les cinq principaux exportateurs – Brésil, Thaïlande, Australie, Afrique du Sud et Guatemala – représentent près de 80% de toutes les exportations mondiales sur le marché libre, à l'exception des marchés préférentiels ou sous quotas. Cette conformation des marchés du sucre a été commentée au Chapitre 2 et il est intéressant d'observer que la part commercialisée sur les marchés internationaux est petite comparée à la production, puisque 69% de la production mondiale est consommée actuellement dans son pays d'origine [FAO (2007b)]. Ainsi, les éventuelles variations dans le volume produit dans chaque pays, en fonction des conditions climatiques, peuvent provoquer des changements importants dans la disponibilité du produit et, par conséquent, dans son prix. Par exemple, l'Inde, qui s'achemine vers la première position parmi les pays producteurs de sucre, a offert certaines années des excédents exportables alors que, d'autres années, elle est devenu un important importateur de ce produit.

Outre la volatilité naturelle d'un marché avec un approvisionnement variable et une élasticité-prix relativement basse, les mouvements du prix du sucre sur le marché international subissent l'influence d'autres sucres, comme le glucose de maïs (*high fructose corn syrup* – HFCS) et des édulcorants à basse calorie, qui représentaient en 2005 18% du marché mondial des édulcorants. Ces dernières années, le glucose de maïs, employé largement dans l'industrie des aliments, a cédé des parts de marché au sucre de canne, à cause de l'élévation des prix de sa matière première.

La consommation mondiale de sucre a connu une expansion régulière à un taux annuel 2% au long des dernières décennies, ce qui représente près de 3 millions de tonnes en plus dans la demande annuelle. La croissance s'est produite principalement dans les pays en développement, suite à l'augmentation des revenus des consommateurs et aux changements d'habitudes alimentaires. Ces marchés représentent déjà actuellement plus de 60% de la consommation mondiale de sucre, et il est attendu que la majeure partie de l'expansion future de la demande proviendra des pays asiatiques [FAO (2007b)]. Cette tendance peut être observée sur le marché indien, où, au cours des 25 dernières années, la consommation de sucre *per capita* est passée 6 kg/an à 17 kg/an, tandis que celle d'autres édulcorants traditionnels (gur et khandsari, produits de manière artisanale à partir de la canne) est passée de 14 kg/an à 9 kg/an [India Infoline (2008)]. Dans un autre marché asiatique important, la Chine, il est estimé que la population consommera 14 millions de tonnes de sucre par an d'ici à 2010, ce qui représenterait une consommation *per capita* de 10 kg/an, valeur qui place ce pays bien au-dessous de la moyenne mondiale située aux alentours de 24 kg/an [FAO (2007b)]. Le Graphique 11 présente la consommation annuelle de sucre *per capita* pour divers pays.

Outre le sucre cristallisé et le sucre raffiné, des produits édulcorants différenciés visant des segments spécifiques du marché consommateur ont fait leur apparition dans l'industrie de la canne à sucre, avec pour conséquence de meilleurs prix pour les producteurs. C'est le cas du sucre certifié « Biologique » (dit aussi sucre « organique »), produit sans produits agrochimiques ni additifs de synthèse, et des sucres mélangés avec des édulcorants à basse calorie, comme l'aspartame ou le sucralose, produit à base de saccharose de canne à sucre.

Les possibilités du sucre organique

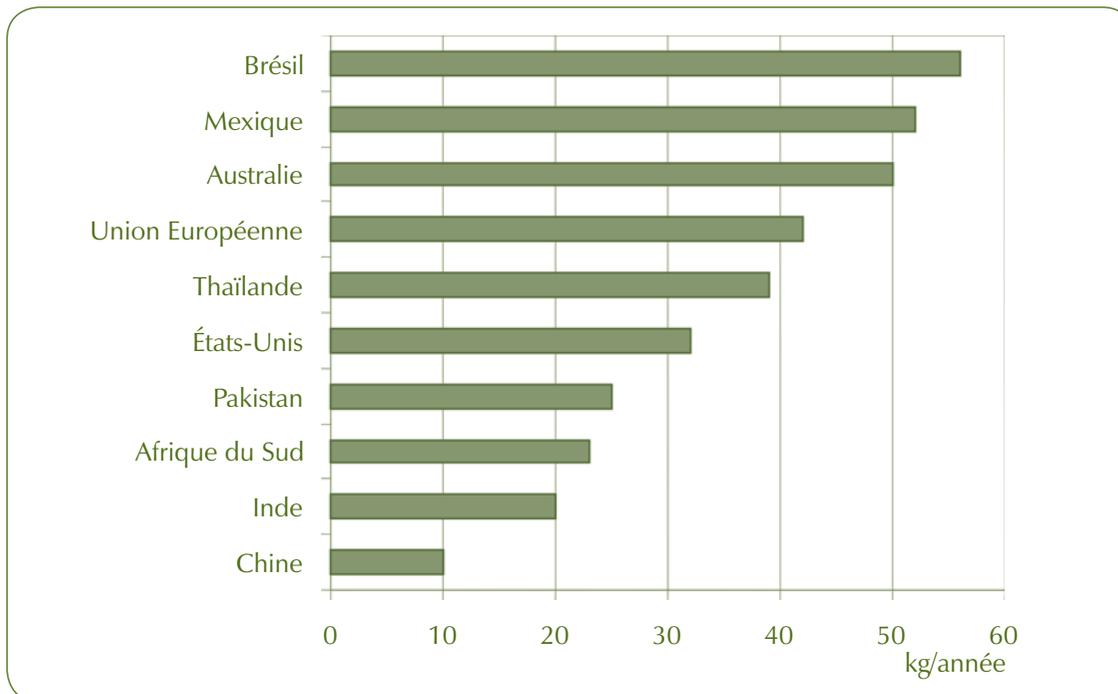
L'évolution du comportement des consommateurs, qui valorisent les produits considérés plus sains et à moindre teneur en additifs chimiques, ouvre un marché intéressant pour l'agro-industrie de la canne à sucre, avec des impacts environnementaux positifs sur la production et le traitement de la canne à sucre. Un bon exemple dans ce sens est présenté par le Groupe Balbo, qui en 1986 a mis en route le Projet Canne Verte : en intégrant de façon pionnière des technologies avancées avec des techniques naturelles traditionnelles de culture de la canne à sucre, il offre une ligne d'aliments « Bio » avec notamment le sucre « Native », fabriqué depuis l'an 2000 par l'Usine São Francisco et commercialisé actuellement dans 40 pays, qui représente presque 22% du chiffre d'affaires de ce groupe.

Pour qu'un produit agro-industriel soit considéré biologique (ou « organique »), il ne suffit pas que la matière première utilisée soit exempte d'agrottoxiques, mais il est nécessaire de repenser et d'adapter tout le système de production. La production Bio s'associe à l'utilisation durable et raisonnée des ressources naturelles, comme la terre et l'eau, suivant une vision intégrée et de respect de la nature, certifiée de façon indépendante par des tiers. Appliquant ce concept sur 13.400 hectares de plantations de canne à sucre totalement certifiés pour la production organique, sont mises en oeuvre à grande échelle la récolte de la canne à sucre sans brûlis, la fertilisation biologique (y compris à l'aide de sous-produits recyclés du traitement industriel), l'emploi des variétés de canne d'une bonne résistance naturelle aux ravageurs et la gestion des plantes adventices et des insectes par des techniques manuelles, mécaniques et biologiques. Dans de telles conditions, le potentiel écologique de la canne est mis en valeur et la fertilité du sol préservée, avec des gains dans les indices de productivité, qui, après quelques années d'adaptation, se situent significativement au-dessus de la moyenne des autres usines. La production « organique » suit des exigences élevées d'impact environnemental également dans l'étape industrielle, grâce à une basse utilisation de produits chimiques et à des procédures avancées pour le contrôle du processus, le suivi opérationnel et la sécurité d'une manière générale. De même, une efficacité énergétique élevée a été atteinte au moyen de l'implantation de systèmes de cogénération efficaces, et de l'obtention et la commercialisation de crédits de carbone, conformément aux termes du Protocole de Kyoto.

Composant important de la production de sucre « organique », la protection de la biodiversité, de la flore et de la faune, et des terres agricoles a été renforcée, avec de bons résultats. Un effort significatif a été déployé pour la formation et la récupération de forêts d'espèces natives. Comparée à d'autres propriétés agricoles de la même région, l'Usine São Francisco présente jusqu'à six fois plus d'espèces d'oiseaux et une bonne variété de mammifères, y compris des carnivores comme la panthère brune et le loup-guará, d'après les informations de l'Inventaire de la Faune réalisé dans la région, confirmant la récupération des équilibres écologiques.

Tout le processus agro-industriel et ses implications environnementales sont suivis périodiquement par diverses institutions scientifiques internationales du Brésil, des États-Unis, d'Europe et du Japon [Native (2008)].

Graphique 11 – Consommation de sucre *per capita* en divers pays



Source : Illovo (2008).

La production de sucre, à base de différentes matières premières et dans divers contextes, présente un large éventail de coûts de production. Le Brésil se distingue comme le pays de moindre coût parmi tous les pays producteurs, suivi par divers pays africains [F. O. Licht (2007)]. Dans une perspective bioénergétique, il est important de mentionner que le bas coût du sucre brésilien est, en grande partie, lié au développement de la technologie agricole et industrielle de ce secteur, associé à l'expansion de la production de bioéthanol. En outre, le bas coût est lié à une production sucrière s'effectuant conjointement avec la fabrication de bioéthanol, comme nous l'avons déjà expliqué au chapitre antérieur, ce qui confère des avantages sur le plan opérationnel et de la qualité du produit. En résumé : le Brésil a réussi à devenir le producteur de sucre le plus grand et au coût le plus faible, parce qu'il a associé sa production à celle du bioéthanol.

4.2 Bioélectricité

Dans la canne à sucre, près d'un tiers de l'énergie solaire absorbée est fixée sous forme de sucre, tandis que le restant correspond à la fibre végétale, composée de cellulose,

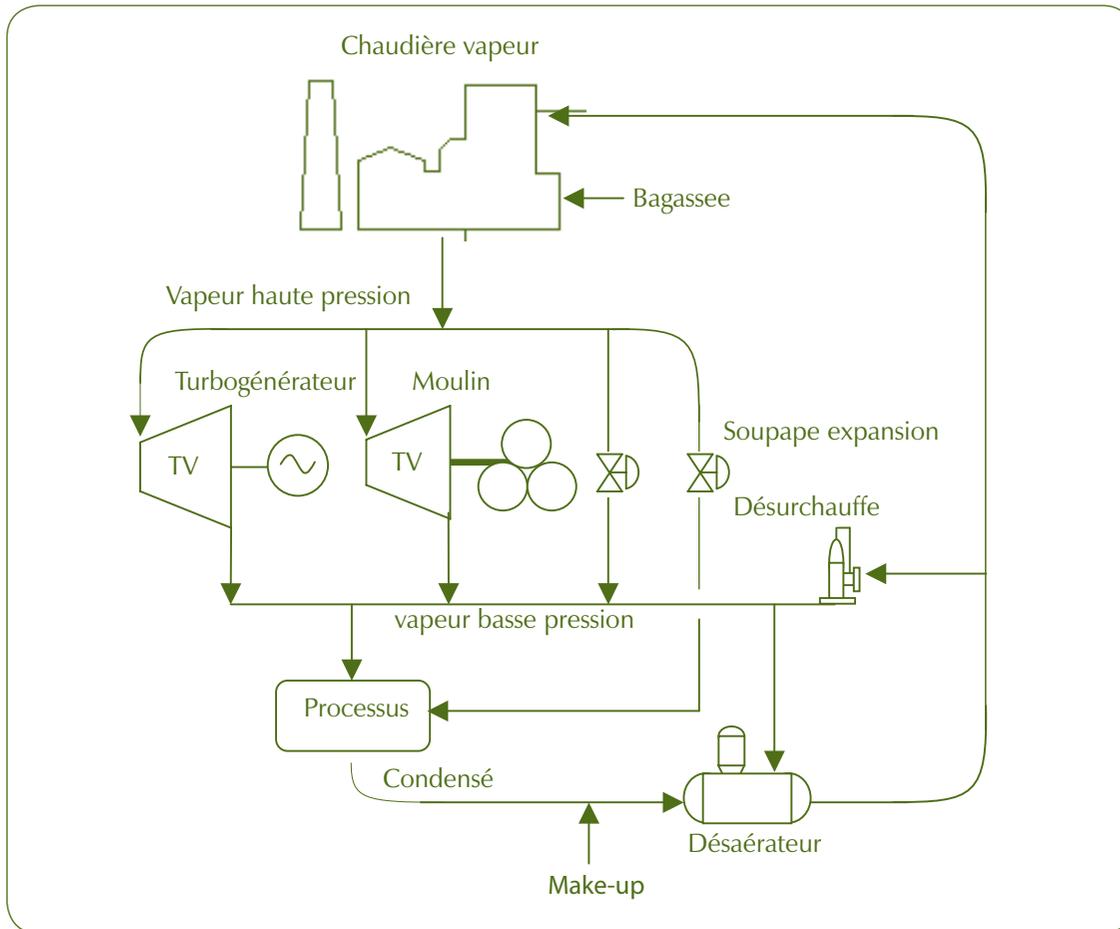
d'hémicellulose et de lignine, qui constituent la bagasse et la paille de la canne. L'utilisation de ces biomatériaux fait l'objet d'un intérêt croissant, avec la bagasse employée régulièrement comme source d'énergie, spécialement dans l'agro-industrie de la canne à sucre.

Dans le traitement industriel de la canne, trois types d'énergie sont nécessaires : thermique pour les processus de chauffage et de concentration, mécanique dans les presses et les autres systèmes en mouvement comme les pompes et les ventilateurs de grande taille, et électrique pour des besoins divers : pompage, systèmes de contrôle et d'éclairage, entre autres. Pour répondre à ces demandes énergétiques, les usines de sucre et de bioéthanol développent la production simultanée de ces différentes formes d'énergie à partir d'un unique combustible, la bagasse. Cette technologie est dénommée cogénération et représente un différentiel important de la canne par rapport aux autres matières premières utilisées dans la fabrication du sucre ou du bioéthanol, qui nécessitent un apport énergétique externe pour le processus industriel.

La Figure 18 présente le schéma habituellement adopté dans le système de cogénération de l'agro-industrie de la canne à sucre dans le monde entier, système dans lequel les principales variations concernent la pression de la vapeur produite dans les chaudières [Seabra (2008)]. En résumé, la chaleur libérée par la combustion de la bagasse dans les chaudières permet de produire une vapeur à haute pression utilisée dans des turbines, pour la production d'électricité et l'énergie mécanique, dont la vapeur d'échappement, à basse pression, sert à des utilisations thermiques. Cette conception de base comporte diverses variantes, qui peuvent augmenter la production d'énergie électrique par tonne de canne traitée, moyennant naturellement des investissements plus élevés. Bien que l'agro-industrie n'utilise pratiquement que la bagasse comme combustible, une partie des résidus de récolte, comme la paille de canne, est aussi utilisée de plus en plus fréquemment.

Dans des conditions standard, le bilan de vapeur d'une usine est en général équilibré, c'est-à-dire que l'offre de vapeur répond suffisamment à la demande. Il apparaît donc que cette agro-industrie s'est ajustée au long de son développement, pour maintenir cet équilibre, en compensant les augmentations du volume de sucres à traiter, découlant des améliorations de la qualité de la canne, par des gains dans l'efficacité des systèmes de génération et par l'utilisation des systèmes à vapeur. Considérant les valeurs actuellement représentatives des usines brésiliennes pour le traitement d'une tonne de canne, valeurs similaires à celles d'autres pays, la disponibilité de bagasse (avec 50% d'humidité) est de l'ordre de 250 kg, ce qui permet de produire entre 500 kg et 600 kg de vapeur, ce qui est du même ordre que le besoin en vapeur du processus, entre 400 kg et 600 kg [Leal (2007)]. Dans ce contexte, avec une gestion responsable des consommations de vapeur et avec l'adoption de chaudières plus efficaces, il est possible d'obtenir des excédents de bagasse. Dans tous les cas, les gains les plus intéressants peuvent être obtenus dans l'étape de production d'énergie du processus.

Figure 18 – Configuration habituelle du système de cogénération dans l’agro-industrie de la canne à sucre



Source : Seabra (2008).

Ces gains sont possibles parce que la production d'énergie électrique et mécanique dans l'agro-industrie de la canne bénéficie d'une marge de manoeuvre importante, au niveau essentiellement des caractéristiques de la vapeur produite dans les chaudières et utilisée au départ par les turbines à vapeur. Alors que la pression de la vapeur à la sortie de ces turbines, par contrainte du processus industriel, est en général proche de 2,5 bar, cette caractéristique à l'entrée des turbines peut être choisie dans un large éventail, selon la chaudière employée, produisant ainsi une puissance proportionnelle à son énergie thermique, fonction de sa pression et de sa température à la sortie de la chaudière. Pratiquement sans faire varier la quantité de combustible, il est possible d'augmenter la production d'énergie électrique dans l'agro-industrie de la canne à sucre en adoptant des chaudières et des turbines à vapeur qui opèrent sous des pressions et des températures plus élevées.

Il est intéressant d'observer comment, au cours des dernières décennies, les paramètres de cette vapeur ont été améliorés progressivement dans le cas brésilien, au cours d'une évolution qui a été imitée dans d'autres pays [Cepal (2006)]. Jusqu'en 1980, les usines de l'État de São Paulo possédaient des chaudières avec des pressions de 12 bar à 22 bar et achetaient 40% de leur énergie électrique consommée. En 1990, avec la substitution progressive des chaudières et des turbines plus anciennes, la pression moyenne de la vapeur dans ces usines avait atteint 22 bar, à des températures de 300° C, suffisantes pour atteindre l'autosuffisance en approvisionnement d'énergie électrique, et la production d'excédents pour la vente. Dans les conditions habituelles, les usines brésiliennes consomment pour la préparation et la mouture de la canne une puissance moyenne de près de 16 kWh par tonne de canne, qui s'ajoutent à la demande d'énergie électrique, de l'ordre 12 kWh par tonne de canne [Macedo et al. (2006)]. Ainsi, les usines d'une capacité de production supérieure à 28 kWh par tonne de canne traitée disposent désormais d'excédents d'énergie commercialisables dans le réseau public.

La mise en valeur plus récente de ces excédents et la possibilité de vendre l'énergie électrique aux concessionnaires ont fait surgir dans de nombreux pays un nouveau cycle de modernisation des systèmes de cogénération dans l'agro-industrie de la canne à sucre ; diverses usines implantent de tels systèmes à pressions élevées, entraînant une production significative d'excédents de bioélectricité. Parmi les facteurs importants d'encouragement à la production d'énergie électrique dans le contexte de la canne à sucre, citons la demande d'une efficacité plus grande et d'un moindre impact environnemental dans le secteur énergétique, l'évolution de la norme régulatrice du secteur électrique et le développement de technologies pour le contrôle des systèmes de cogénération de taille moyenne.

La cogénération est, intrinsèquement, bien supérieure à la production thermo-électrique conventionnelle en termes d'efficacité. Les technologies thermoélectriques conventionnelles convertissent en énergie utile, le plus souvent, près de 30% et, sous des conditions-limites, jusqu'à 50% de l'énergie fournie par le combustible, en rejetant inévitablement une part importante d'énergie thermique dans l'environnement. Les systèmes de cogénération, en destinant la chaleur rejetée à la couverture des nécessités thermiques du processus, permettent d'obtenir des efficacités supérieures à 85% dans l'utilisation de l'énergie du combustible, avec des bénéfices évidents sur le plan de l'économie et de la réduction des impacts environnementaux. Malgré ces avantages, la position de monopole des entreprises d'énergie électrique et la rigidité de la norme régulatrice empêchaient pratiquement l'opération d'interconnexion de ces producteurs et la commercialisation des excédents disponibles. Heureusement, ces conditions ont évolué favorablement et, dans divers pays, l'agro-industrie de la canne à sucre devient un acteur de plus en plus important de l'offre d'énergie électrique. En ce sens, le cas brésilien est emblématique : dans les cinq premières années de cette décennie, l'énergie électrique apportée au réseau public en provenance de l'agroindustrie de la canne à sucre s'est développée à un taux annuel de 67% [Moreira et Goldemberg (2005)].

Ayant cette possibilité de commercialiser leurs excédents de bioélectricité, les usines de sucre et de bioéthanol ont commencé également à mettre en valeur les résidus solides de la récolte, qui peuvent augmenter d'avantage encore la disponibilité en énergie électrique. Naturellement, l'emploi de la paille de canne dans les chaudières, représentant près de 140 kg par tonne de canne récoltée, amène de nouvelles questions d'ordre pratique, concernant la récolte, la manipulation et l'opération des chaudières avec ce biocombustible ; ces questions sont résolues peu à peu, permettant ainsi que ces biocombustibles solides puissent être récoltés et amenés aux usines industrielles à des prix acceptables (entre US\$ 0,80 et US\$ 1,80 par GJ). Cependant, il est recommandé que près de la moitié de la paille soit laissée sur le sol, pour des raisons agronomiques comme la réduction de l'érosion, le recyclage d'éléments nutritifs et le maintien d'un niveau minimum d'humidité dans le sol [Hassuani et al. (2005)]. Un autre thème associé à la production de bioélectricité destinée à la commercialisation concerne le fonctionnement des usines en période d'inter récolte, lorsqu'il n'est plus nécessaire de produire de la chaleur ; un stockage de la bagasse s'impose alors, et il commence d'ailleurs à être mise en oeuvre dans les usines de divers pays, avec des résultats favorables, en fonction du modèle d'offre énergétique et des conditions particulières de travail.

Le Tableau 18 montre comment les caractéristiques de la vapeur conditionnent directement la production d'excédents énergétiques dans les usines de sucre et de bioéthanol. Le calcul de ces valeurs est basé sur les hypothèses suivantes : une production de 280 kg de bagasse (50% d'humidité) par tonne de canne, une pression de vapeur pour l'usine de 2,5 bar, et l'utilisation de turbines à vapeur de contre-pression (sauf dans le cas d'un fonctionnement en inter-récolte ou dans le cas d'un processus de production fonctionnant avec de basses consommations en vapeur, situations qui imposent l'emploi de turbines de condensation, avec un condensateur fonctionnant à 0,12 bar). Dans les cas avec utilisation de la paille, 50% de celle-ci est supposée rester au champ, ce qui représente une disponibilité effective de 70 kg de ce biocarburant par tonne de canne récoltée.

Comme indiqué au Tableau 18, l'élévation de la pression (de vapeur) s'accompagne d'une augmentation importante des excédents d'énergie électrique exportables. En outre, pour le cas étudié, une réduction de la consommation de vapeur durant le processus de production, de 500 kg à 350 kg de vapeur par tonne de canne traitée (kg/tc), conduit à une augmentation de 24% des excédents d'énergie électrique ; avec l'utilisation partielle de la paille, ces excédents croissent de 141%. Il convient encore d'observer qu'ont été mis en oeuvre actuellement au Brésil des systèmes de cogénération avec des chaudières opérant au-dessus de 90 bar, avec une production estimée, dans ces cas, à 146 kWh par tonne de canne pour le réseau public [Seabra (2008)]. Dans une autre étude, il a été établi que, en prenant en compte la technologie disponible actuellement la plus efficace dans le domaine des systèmes à vapeur pour les usines de sucre – avec une production de vapeur à 105 bar et à 525° C, une réduction de la demande de vapeur de processus à 280 kg par tonne de canne, l'utilisation totale de la bagasse et de 50% des pointes et des feuilles, et avec l'usine opérant durant toute l'année –, il serait possible de fournir au réseau des excédents de 158 kWh par tonne de canne traitée [Walter e Horta Nogueira (2007)].

Tableau 18 – Energie électrique et bagasse excédente dans des systèmes de cogénération dans l’agro-industrie de la canne à sucre

| Paramètres du système de cogénération | Consommation de vapeur de processus | Période de production | Utilisation de la paille | Energie électrique excédente | Bagasse excédente |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|
| 21 bar, 300° C | 500 kg/tc | récolte | não | 10,4 kWh/tc | 33 kg/tc |
| 42 bar, 400° C | 500 kg/tc | récolte | não | 25,4 kWh/tc | 50 kg/tc |
| 42 bar, 450° C | 500 kg/tc | récolte | não | 28,3 kWh/tc | 48 kg/tc |
| 65 bar, 480° C | 500 kg/tc | récolte | não | 57,6 kWh/tc | 13 kg/tc |
| 65 bar, 480° C | 350 kg/tc | récolte | não | 71,6 kWh/tc | 0 kg/tc |
| 65 bar, 480° C | 500 kg/tc | toute l’année | 50% | 139,7 kWh/tc | 13 kg/tc |
| 65 bar, 480° C | 350 kg/tc | toute l’année | 50% | 153,0 kWh/tc | 0 kg/tc |

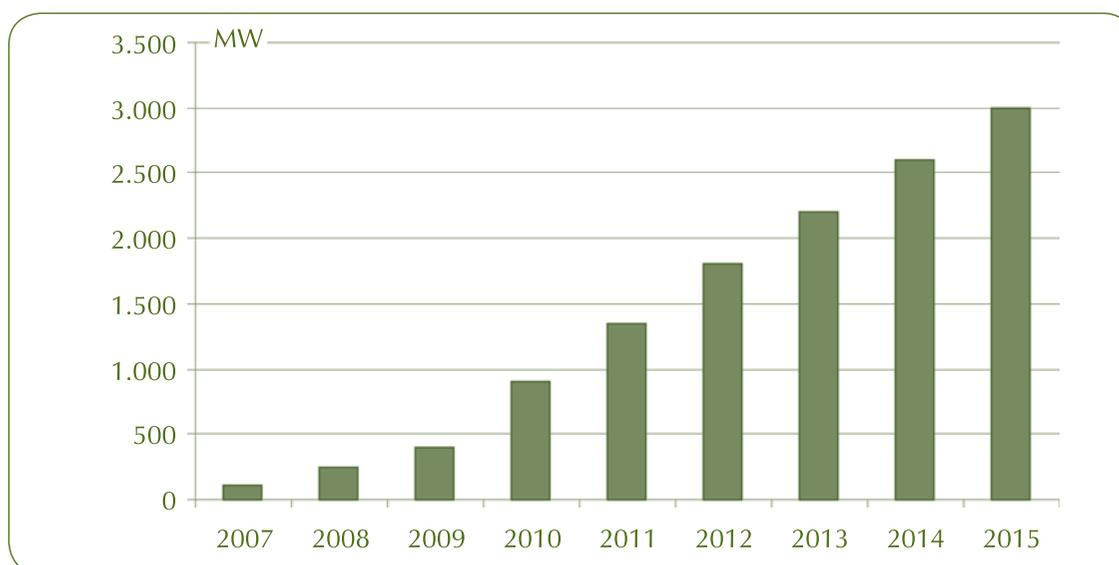
Source : CGEE (2005).

Considérant une usine de sucre et de bioéthanol dans les conditions typiques du Centre-Sud brésilien, avec une mouture annuelle de 2 millions de tonnes de canne, des systèmes de cogénération conventionnels à 65 bar et 480° C correspondent à une capacité installée de production de 31 MW, tandis que pour des systèmes optimisés à 90 bar et 520° C, cette puissance monte à 82 MW, pour un fonctionnement durant la récolte [Seabra (2008)]. L’obtention de gains énergétiques significatifs grâce à l’utilisation de caractéristiques de vapeur plus élevées dans ces systèmes de cogénération, en vue d’augmenter la production d’énergie électrique excédente, implique des investissements proportionnellement plus élevés et dont l’amortissement dépend, entre autres variables, du cadre tarifaire, de la norme régulatrice et des perspectives d’offre du secteur électrique, conditions qui sont essentiellement étrangères à l’activité habituelle des usines. L’expansion de la capacité de production électrique des usines est cependant remarquable, comme le montre bien le cas brésilien [CGEE (2006)].

Selon les statistiques de l’Agence Nationale d’Énergie Électrique (Aneel), la capacité installée de production d’énergie électrique à base de bagasse atteignait, en mars 2008, 3.081 MW, plus 460 MW en construction ou en attente d’autorisation de mise en route [Aneel (2008)]. En 2006, ces centrales représentaient une production de 8.357 GWH, soit près de 2% de la production brésilienne d’électricité [EPE (2007)]. Rien que pour l’État de São Paulo, qui représente près de 60% de la production brésilienne de sucre et de bioéthanol et dont les 131 usines ont traité 264 millions de tonnes de canne lors de la récolte 2006/2007, la capacité installée est de 1.820 MW, avec des excédents pour le réseau public de 875 MW [CogenSP (2007)]. Rien que dans cet Etat, l’expansion prévue pour la production d’excédents d’énergie électrique par l’agro-industrie de la canne à sucre est significative (voir Graphique 12). Pour tout le Brésil, la

capacité de production d'énergie électrique pour le réseau public à base de bagasse pourra atteindre 15 GW d'ici à 2015, soit 15% de la puissance actuelle installée dans les centrales électriques brésiliennes. Selon certaines projections, les résultats économiques liés à la production de bioélectricité pourraient devenir équivalents à ceux de la production de sucre dans les usines plus modernes, en incluant la production de bioéthanol, de sucre et d'énergie électrique [F. O. Licht (2008)]. Sur un horizon plus éloigné, considérant les demandes prévues en bioéthanol et les disponibilités en bagasse associées à cette production, Walter et al. (2006) estiment que la capacité installée pourra arriver en 2025 à 38,4 GW (dans le cas d'une utilisation de la bagasse pour la production de bioéthanol par hydrolyse et où les chaudières utiliseraient seulement 60% de la paille disponible) ou 74,7 GW (dans le cas où toute la bagasse et 60% de la paille seraient utilisées pour produire de la bioélectricité).

Graphique 12 – Capacité des systèmes de cogénération à installer dans les usines de sucre et de bioéthanol dans l'État de São Paulo au cours des prochaines années

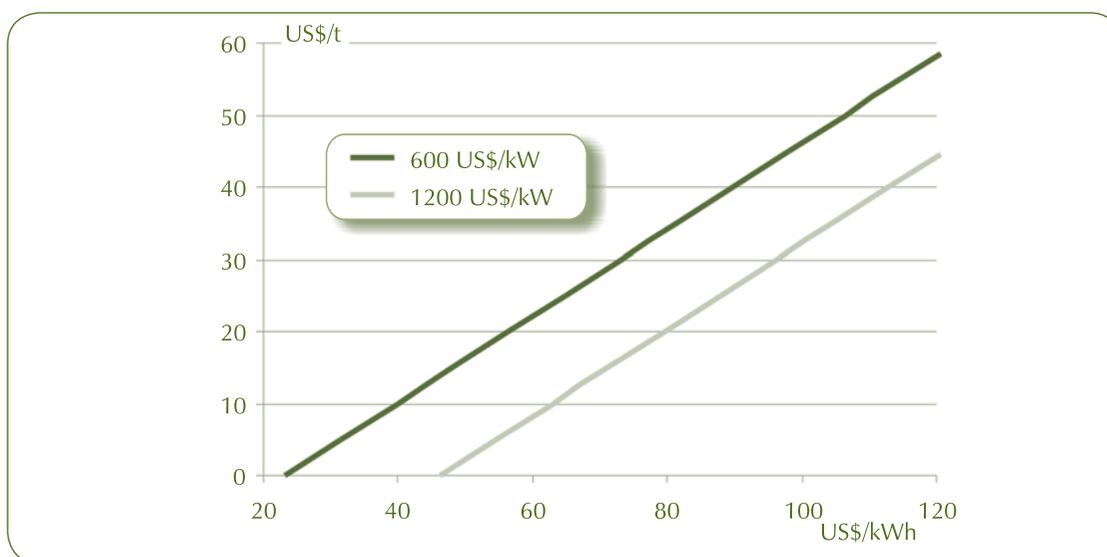


Source : CogenSP (2008).

Avec le développement probable du processus de production de bioéthanol à base de bagasse, il devient intéressant d'analyser des conditions de compétitivité relative de cette biomasse, c'est-à-dire qu'il convient de chercher les solutions plus attrayantes sur le plan économique. Dans ce sens, une évaluation comparative préliminaire de la valeur économique entre deux produits alternatifs de la bagasse – la bioélectricité et le bioéthanol par hydrolyse – est présentée aux Graphiques suivants. Au Graphique 13, la valeur économique de la bagasse est définie par le tarif de vente de l'énergie électrique, en considérant deux valeurs pour le coût unitaire de la capacité de production d'électricité. De manière analogue, au Graphique 14 a été estimé la valeur de la bagasse lorsqu'elle est utilisée pour la production de bioéthanol par hydrolyse (ce qui sera mieux débattu au prochain chapitre), en supposant une productivité de 378 litres de bioéthanol par tonne de bagasse sèche. Dans ce cas, les valeurs des

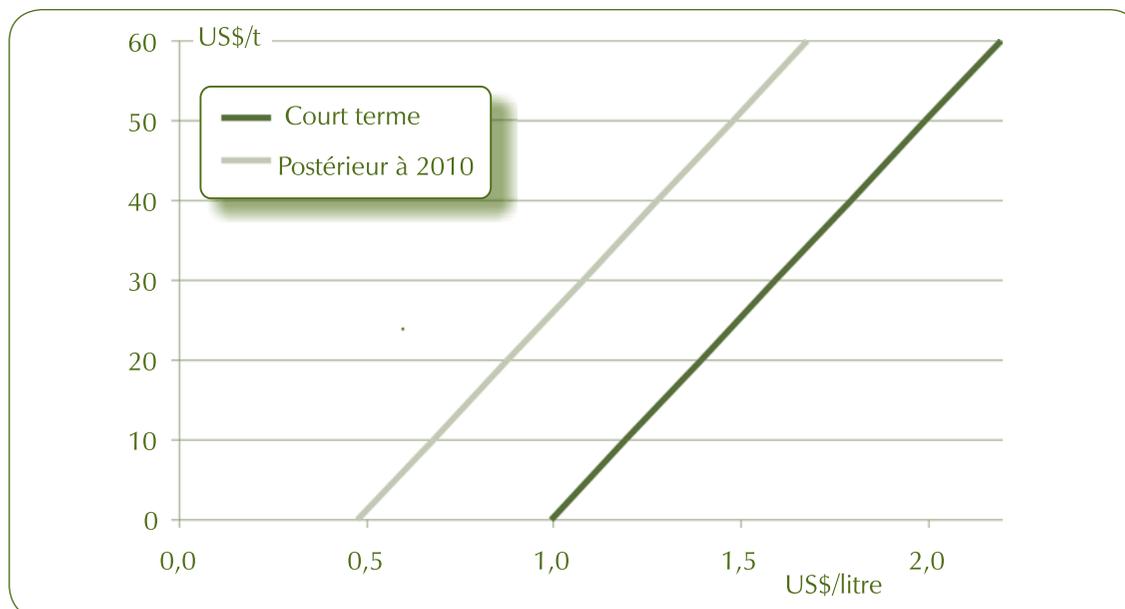
frais de structure et de fonctionnement de l'unité industrielle ont été tirés de la littérature, en variant selon le niveau de maturité technologique, entre US\$ 0,26 et US\$ 0,13 par litre de bioéthanol produit, respectivement, pour un court terme et pour la période postérieure à 2010 [IEA (2005)].

Graphique 13 – Valeur de la bagasse utilisé pour la production d'électricité



Source : Élaboration de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Graphique 14 – Valeur de la bagasse utilisée pour la production d'éthanol



Source : Élaboration de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Evolution de la production d'électricité dans une usine brésilienne



Usine Vale do Rosário.

Un exemple représentatif de l'évolution par laquelle sont passées les usines de sucre et d'éthanol au Brésil, à la recherche d'excédents plus importants d'énergie électrique, est donné par l'Usine du Rosário [Heck (2006)]. Localisée à Morro Agudo, São Paulo, et appartenant au Groupe Crystalsev, qui gère plusieurs unités dans la région, cette usine traite actuellement environ 5 millions de tonnes de canne par récolte. En 1986 ont commencé les modifications du système énergétique, qui à l'époque satisfaisait toute la demande industrielle mais sans produire d'excédents. La motivation de l'introduction de perfectionnements est née de l'existence d'un potentiel pour produire d'avantage d'énergie électrique (grande disponibilité en vapeur directe pour répondre à la demande de vapeur d'échappement + excédents de bagasse) et de la position favorable de la concessionnaire locale (CPFL) à l'acquisition d'excédents d'électricité. Dans une première phase, avec des chaudières opérant à 22 bar et 280° C, des turbines à vapeur plus efficaces et des procédures de rationalisation de l'utilisation de la vapeur ont été introduites, ce qui a permis, lors de la récolte de 1993, d'obtenir une production de 4,7 kWh d'excédents par tonne de canne traitée et l'établissement d'un contrat de dix ans avec la CPFL pour la vente de 4 MW durant la récolte. Dans une seconde phase, mise en oeuvre entre 1995 et 1997, furent acquises deux nouvelles chaudières fonctionnant sous 44 bar et 430° C et un turbogénérateur de 12 MW, ce qui a augmenté la production jusqu'à 16,5 kWh par tonne de canne et justifia un nouveau contrat avec la CPFL pour la vente de 15 MW à partir de 1998, motivant la construction d'une nouvelle sous-station et d'une ligne à haute tension (138kV) de 16 km. Dans la phase suivante, complétée en 2001, des nouveaux turbogénérateurs utilisant des turbines d'extraction/condensation furent installés, permettant de renouveler le contrat avec la concessionnaire pour la fourniture de 30 MW. Dans la dernière phase, conclue en 2005, fut introduite une chaudière produisant 200 tonnes de vapeur par heure, à 65 bar et 515° C, grâce à laquelle l'usine a atteint une production de 65 MW d'excédents, ce qui correspond à 60 kWh par tonne de canne traitée.

Les Graphiques 13 et 14 permettent de tirer une conclusion intéressante. La valeur d'opportunité de la bagasse pour la production d'énergie électrique, en considérant les tarifs habituels de l'énergie électrique (au-dessus de US\$ 60 par kWh, aux prix de 2005) et les prix de marché du bioéthanol (généralement autour de US\$ 0,50 par litre), indique clairement l'attractivité plus grande de la production bioélectrique face à la production de bioéthanol, du moins sur le scénario actuel de prix des vecteurs énergétiques. Cette constatation ne dépend pas, en principe, des aspects stratégiques associés à la planification énergétique, qui renforcent l'attractivité de l'offre d'électricité, dans le cas brésilien, et de combustibles liquides, dans le cas nord-américain.

L'utilisation de bagasse pour la production d'énergie électrique permet de réduire les émissions de carbone dans l'atmosphère, puisqu'elle se substitue au pétrole brûlé dans les usines thermoélectriques conventionnelles, usines dont l'activité augmente exactement justement à l'époque de la récolte car celle-ci coïncide avec les mois où la capacité de production hydroélectrique diminue. Dans ce cas, la réduction d'émissions est de l'ordre de 0,55 tonne de CO₂ équivalente par tonne de bagasse utilisée. Une telle réduction d'émissions de gaz à effet de serre peut être prise en compte pour l'obtention de crédits de carbone, car elle présente un élément d'additionnalité (la réduction d'émissions de gaz à effet de serre doit être additionnelle à celles qui auraient eu lieu en l'absence de l'activité) et dispose d'une méthodologie de ligne de base consolidée approuvée (Méthode AM0015 – « Cogénération à base de bagasse interconnectée à un réseau d'électricité ») pour la quantification et la certification de ces crédits (réductions certifiées d'émissions, RCEs), selon les termes du Mécanisme de Développement Propre (MDP), tels qu'établis par le Protocole de Kyoto.

Dans le cas brésilien, la responsabilité de la conformité et le suivi des projets de MDP incombent à la Commission Interministérielle de Changement Global du Climat (CIMGC), rattachée au Ministère de la Science et de la Technologie. Jusqu'en mars 2008, 24 projets brésiliens de cogénération avec de la bagasse de canne étaient enregistrés auprès de la Convention-Cadre des Nations Unies pour le Changement du Climat (UNFCCC), correspondant à une réduction totale d'émissions annuelles de CO₂ de 461.000 tonnes. Les facteurs d'émission adoptés dépendent de la région où les projets sont situés, et valent 0,136 et 0,2826 tonnes de CO₂ équivalent par kWh produit, respectivement, au Nord-Est et au Centre-Sud, pour la période de 2004 à 2006 [MCT (2008) et Ecoinvest (2008)].

Pour conclure cette discussion sur la bioélectrique considérée comme un coproduit important de l'agro-industrie de la canne à sucre, il est opportun de commenter le potentiel du développement technologique dans ce domaine. Au chapitre suivant, nous aborderons plus en détail le processus de gazéification de la bagasse, qui pourra augmenter de manière significative la production d'énergie électrique, avec une expectative de production supérieure à 180 kWh par tonne de canne traitée. Un autre processus qui a motivé de nouvelles études pour la production de bioélectrique est la biodigestion de la vinasse qui, sans réduire son potentiel fertilisant, pourra permettre d'obtenir des excédents additionnels d'énergie électrique dans les usines de bioéthanol. Il est estimé que la vinasse résultant de la production

d'un mètre cube de bioéthanol, traitée par méthode anaérobique (en l'absence d'oxygène), produit 115 mètres cubes de biogaz, capables de produire à leur tour 169 kWh de bioélectricité, après décompte des consommations liés au process de production [Lamonica (2006)]. Cependant, les coûts élevés associés à la biodigestion de la vinasse limitent encore l'intérêt pour cette valorisation.

Évaluant les possibilités futures de conversion énergétique dans l'agro-industrie de la canne, en conjugant différents produits et solutions technologiques potentiellement disponibles au cours des 20 prochaines années, Macedo (2007) a estimé que l'on pourrait récupérer jusqu'à 59% du contenu énergétique total de la canne, entre biocarburant et bioélectricité, rendement bien supérieur aux actuels 38%. Dans une étude plus spécifique à l'énergie électrique, en explorant les limites thermodynamiques de la production d'énergie électrique à base de canne via des process technologiques plus avancés, Lora et al. (2006) ont considéré différentes alternatives complémentaires et associées, selon deux scénarios de base : augmentation maximum de la production de biocarburants et augmentation maximum de la production de bioélectricité. Ainsi, grâce à l'utilisation de technologies encore en développement ou encore faiblement diffusées, comme les gazéificateurs de bagasse associés à des turbines à gaz, les biodigesteurs de vinasse et les cellules à combustible qui utilisent le bioéthanol réformé, il serait possible d'obtenir plus de 510 kWh d'énergie électrique par tonne de canne traitée. Il faut observer que ce potentiel ne représente effectivement qu'à peine environ 25% du potentiel énergétique de la canne, puisque l'énergie disponible dans le sucre et dans la fibre est de l'ordre de 7.200 MJ par tonne de canne. En d'autres mots, la limite supérieure pour la production d'énergie électrique à base de canne est plusieurs dizaines de fois supérieure à la production moyenne observée actuellement dans les usines brésiliennes, production dont le développement actuel ne serait donc qu'à ses débuts.

4.3 Autres coproduits du bioéthanol de canne à sucre

De façon analogue au maïs, qui donne naissance à une gamme diversifiée de produits, la canne à sucre permet de produire bien plus que le bioéthanol, le sucre et de l'électricité. Parmi les coproduits traditionnels de la canne, on pourrait citer la mélasse, l'eau-de-vie, la bagasse, la levure, le tourteau de filtration et la vinasse ; la liste des nouveaux produits, longue et variée, va depuis des produits qui accentuent la saveur, pour l'industrie des aliments, jusqu'à du plastique pour emballages. Une étude détaillée publiée au Brésil en 2005, présente plus de 60 technologies employant la canne à sucre comme matière première en différents secteurs industriels [IEL/Sebrae (2005)], et elle fut la principale source d'informations pour le présent chapitre. Au début, elle présente de brefs commentaires sur les produits traditionnels et ensuite elle traite des produits innovants, une bonne partie d'entre eux étant en rapport avec l'industrie alimentaire. Les produits encore en développement feront l'objet de commentaires au chapitre suivant.

La mélasse – miel pauvre ou miel résiduel de la fabrication de sucre – est largement utilisée pour la production de bioéthanol dans les distilleries annexées aux usines, mais elle peut être utilisée également pour l'alimentation des animaux ou pour la culture de champignons et de bactéries dans des processus de fermentation débouchant sur la fabrication de produits chimiques et pharmaceutiques, ainsi que sur la production du ferment biologique couramment employé dans l'industrie de la boulangerie. Dans ce contexte, la levure est l'extrait sec obtenu au moyen de trois processus alternatifs : la concentration du lait de levure, ou du fond de cuve, ou encore de la vinasse. Elle constitue un supplément protéique de bas coût, employé comme composant de ration animale et dans l'industrie alimentaire. Il est estimé que, pour chaque litre de bioéthanol, sont produits de 15 à 30 grammes de levure sèche [Leal (2008) e Pesquisa Fapesp (2002)].

La bagasse est mise en valeur principalement comme combustible, outre le fait qu'elle constitue une source de cellulose pour les industries du papier et du carton. À São Paulo, la bagasse possède une valeur commerciale effective, grâce à sa capacité énergétique, et elle est utilisée régulièrement dans les industries céramiques et dans la transformation des oranges, entre autres applications. De plus, la bagasse peut être traitée en vue d'améliorer sa digestibilité et d'incorporer des sources d'azote pour son utilisation dans l'alimentation bovine. La vinasse et le tourteau de filtration présentent une bonne valeur comme fertilisants, et sont largement employés dans l'agro-industrie elle-même, qui absorbe toute la disponibilité de ces produits pour la réforme (replantation) et le maintien de la fertilité des plantations de canne à sucre qui la produisent.

Le gaz carbonique produit dans les cuves de fermentation est généralement lavé pour récupérer le bioéthanol entraîné et libéré dans l'atmosphère, mais il peut être purifié, désodorisé, liquéfié et stocké sous pression pour d'autres finalités, comme la production de boissons rafraîchissantes et de glace carbonique, dans la fabrication de sodium et dans le traitement d'effluents. Le bilan de masse de la fermentation indique que, dans la fabrication de mille litres de bioéthanol anhydre, sont produits jusqu'à 760 kg de gaz carbonique. Quelques usines brésiliennes de bioéthanol ont mis en oeuvre des unités de traitement de gaz carbonique, comme l'usine JB Açúcar e Álcool, à Vitória de Santo Antão, dans le Pernambuco, qui, durant la récolte, produit 528 tonnes mensuelles de gaz carbonique à usage alimentaire [Carbogás (2008)].

Alors que les produits traditionnels ci dessus ne peuvent apporter qu'une valorisation complémentaire limitée à la production de bioéthanol (c'est pour cela qu'ils sont dénommés sous-produits), les produits innovants représentent le résultat de l'incorporation de technologies de plus grande complexité et sont d'une signification économique plus importante. Ils imposent toujours une étape additionnelle de traitement, comme par exemple pour la production d'acides et d'acides aminés par voies de fermentation. Le Tableau 19 présente une vision générale des nouveaux produits de la canne à sucre, déjà commercialisés ou en début de commercialisation (modifié de IEL/Sebrae, 2005). Ce marché offre de bonnes perspectives, entre autres raisons, parcequ'il concerne des produits moins agressifs sur le plan de l'environnement et qui peuvent, dans certains cas, être appliqués dans des secteurs économiquement vastes.

Tableau 19 – Nouveaux produits de l’agro-industrie de la canne à sucre

| Famille | Matière première | Produits |
|---|-------------------------------|--|
| <i>Biotechnologiques</i> : matières produites à base des fonctions biologiques d’organismes vivants | Mélasses | a) Acide citrique b) Aminoacides : lysine c) Produits phytosanitaires : régulateur de croissance ou phytorégulateurs (acide indolacétique, acide jasmonique), anti-prédateur (biofongicide, contrôleur biologique, insecticide biologique, anti-prédateur biologique) d) Fixateur d’azote e) Inoculation pour fourrage vert |
| <i>Pharmaceutiques-vétérinaires</i> : substances chimiques, biologiques, biotechnologiques ou de préparation manufacturière, appliquées directement ou mélangées aux aliments, destinées à prévenir et traiter les infirmités des animaux | Mélasses et bagasse | a) Intrants industriels (dextrane technique, gluconate de calcium, mannitol, sorbitol et tensioactifs biodégradables) b) Furfural (liqueur de xylose, furfural, alcool furfurylique, composés furano-époxy, préservateur du bois, résines de fonderie) c) Plastiques (PHB e PHB/hl, PHA mcl/PHB hpe). d) Intrants pour l’industrie du papier et de la cellulose (moyen pour froisser, pâtes chimico-thermomécaniques, moyens filtrants) e) Vinsasse concentrée |
| <i>Pharmaceutiques-vétérinaires</i> : substances chimiques, biologiques, biotechnologiques ou de préparation manufacturière, appliquées directement ou mélangées aux aliments, destinées à prévenir et traiter les infirmités des animaux | Mélasses et bagasse | a) Préparation antidiarrhéique b) Complexe ferro-dextrane c) Probiotique |
| <i>Aliments</i> | Mélasses, bagasse et vinsasse | a) Dérivés de la levure, fructose et glucose, b) Fructo-oligo-saccharides, c) Sirops invertis par voie enzymatique d) Champignons comestibles de l’espèce <i>Pleurotus ostreatus</i> . |
| <i>Biologiques</i> | Bagasse | a) Composé fertilisant |
| <i>Structurels</i> : matériaux dont les propriétés les rendent utilisables en des structures, des machines ou des produits consommables | Bagasse | a) Agglomérés de bagasse/ciment b) Agglomérés MDF |

Source : Modifié de IEL/Sebrae (2005).

L'acide citrique est produit depuis des décennies au Brésil par un processus de fermentation, en utilisant des cultures du champignon *Aspergillus niger* sur un substrat de mélasse dissoute dans de l'eau. Cet acide est un intrant utilisé pour la préservation des aliments, et aussi pour leur donner du goût. Il sert également pour le nettoyage d'équipements industriels et la fabrication de détergents et d'autres produits d'hygiène et de nettoyage. Les difficultés de production de cet acide de façon économique est dûe au maintien des souches productives et au contrôle soigné des conditions environnementales.

Parmi les aminoacides qui peuvent être produits au moyen de la fermentation de sucre, citons la lysine, dont le marché principal, outre les applications pharmaceutiques, est la formulation de rations pour volaille et porcs, marché qui a notablement augmenté. Cet aminoacide est dénommé essentiel parce que les animaux, ainsi que les humains, n'ont pas les voies enzymatiques pour le synthétiser, ce qui exige son assimilation par voie alimentaire. La majeure partie des aliments pour animaux, composée de carbohydrates végétaux, étant déficiente en lysine assimilable, elle doit être ajoutée dans la ration. D'où le grand intérêt par la lysine, dont les importations au Brésil ces dernières années furent de l'ordre de 10 mille tonnes par an.

Il est opportun d'observer les manières selon lesquelles l'agro-industrie de la canne s'est diversifiée au Brésil, dans un milieu de complexité technologique accentuée et visant à ajouter de la valeur. La mise en oeuvre de processus tournés vers de nouveaux produits de la canne à sucre a suivi deux voies. Dans la première, l'industrie du sucre et de l'alcool a cherché à diversifier sa ligne de produits ; ce fut par exemple le cas du groupe Zillo Lorenzetti qui a fondé, à la fin de l'année 2003, la Biorigin, entreprise de biotechnologie spécialisée dans la production d'ingrédients naturels pour l'industrie de l'alimentation humaine et pour animaux ; ce fut aussi le cas des dizaines d'entreprises qui ont mis en oeuvre des processus de séchage de levure, pour sa commercialisation, comme dans les usines de Santa Adélia, São Martinho, Santo Antônio, São Francisco, Viralcool, Usina Andrade, São Carlos, Galo Bravo, Cresciumal, Santa Cruz OP, Jardest, São José da Estiva, Cerradinho, Equipav, Nova América, Pitangueira et Bonfim [IEL/Sebrae (2005)]. Près de 50% de la levure produite est destinée au marché intérieur, où elle est utilisée principalement dans l'alimentation des volailles (environ 50%) et des porcins (près de 30%). Les autres 50% de la production sont exportés, dans leur majeure partie (80%) vers des pays du Sud-Est Asiatique, où la levure est employée dans l'alimentation des poissons et des crevettes. Avec un prix de référence de US\$ 12,5 par kg de levure sèche [IEL/Sebrae (2005)], la production de levure permet d'obtenir entre US\$ 187 et US\$ 375 pour mille litres de bioéthanol produit, un résultat remarquable en termes de rendement économique du processus agro-industriel.

Dans la deuxième voie, d'autres secteurs industriels, comme l'alimentaire et le chimique, ont incorporé de façon croissante des matières premières associées à la canne. Ainsi, Alltech, une multinationale du secteur des aliments pour animaux, a installé en 2005, près de l'Usine Vale do Ivaí, au Paraná, une unité de production de levure considérée comme une des plus grandes au monde, avec une capacité de 50 mille tonnes annuelles, destinées à 80% au marché extérieur [JornalCana (2005)]. C'est le cas également des entreprises Ajinomoto, du

Japon, et Cheil Jedang, de Corée du Sud, qui ont installé au Brésil des unités consacrées à la production de lysine, mettant à profit la technologie et le bas coût du sucre, matière première qui substitue désormais le maïs et le soja utilisés dans d'autres pays. Ensemble, les deux nouvelles fabriques vont produire 180 mille tonnes par an, quand leurs installations seront complètes. Les avantages économiques sont importantes : transformé en lysine, le sac de sucre de 50 kg vaut US\$ 50, c'est-à-dire près de sept fois plus que le sucre lui-même [Inovação Unicamp (2005)]. Cet exemple illustre la grande intégration existant entre l'agro-industrie de la canne à sucre et les industries alimentaires.

Pour conclure sur ces nouveaux produits, il est important d'observer que les investissements industriels à réaliser rapportés à la valorisation économique attendue, sont relativement faibles, en comparaison avec ceux d'une usine de bioéthanol. Il est probable que le plus grand défi à relever pour la promotion et la diffusion adéquates de ces innovations soit la maîtrise des technologies concernées, c'est à dire une connaissance opérationnelle de la biotechnologie moderne et des équipements de production et de contrôle requis.



Chapitre 5

Futures technologies de l'agro-industrie de la canne à sucre

La diversité des productions issues de la canne à sucre ne se limite pas aux résultats décrits précédemment. Le présent chapitre, basé essentiellement sur les études publiées en 2008 par Seabra, concerne en effet les technologies innovantes d'utilisation de la canne comme intrant industriel et énergétique et qui permettent la production de bioéthanol via la mise en valeur des matériaux lignocellulosiques, au moyen de son hydrolyse ou de sa gazéification, et la production de plastiques biodégradables. Ce chapitre comporte aussi une évaluation des opportunités d'emploi du bioéthanol comme intrant de base dans l'industrie pétrochimique (ou « alcoo-chimie »), domaine dans lequel des projets importants ont déjà été développés il y a quelques décennies, et qui sont à présent repris dans de nouvelles initiatives.

Au fur et à mesure que la canne, avec ses sucres et ses fibres, devient source de matériaux intéressants pouvant être utilisés dans une large gamme de produits via des processus intégrés et interdépendants, les usines de sucre et de bioéthanol se conçoivent de plus en plus comme des « bioraffineries », qui imitent les raffineries de pétrole actuelles, mais sur de nouvelles bases, renouvelables et plus saines sur le plan de l'environnement.



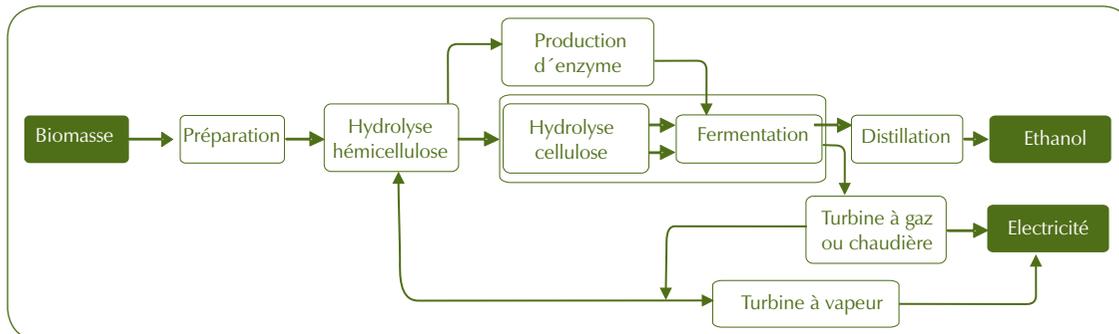
5.1 Hydrolyse de résidus lignocellulosiques

Comme présenté au Chapitre 3, les technologies disponibles actuellement sur le plan commercial pour la production de bioéthanol au moyen de l'amidon et de ses sucres – par exemple à base de maïs et de betterrave, produisent des gains énergétiques et environnementaux assez maigres, sauf dans le cas de la canne à sucre. En outre, ces matières premières amylicées présentent un avantage économique limité et trouvent en général des marchés alternatifs plus rémunérateurs comme aliments ou intrants pour d'autres utilisations. Malgré ses avantages évidents, la canne à sucre n'est cependant pas une option viable pour toutes les régions de la planète. C'est principalement pour ce motif que les pays de l'hémisphère nord recherchent sans cesse des solutions technologiques qui permettraient de produire un biocarburant efficace, tant du point de vue de l'environnement que du point de vue économique. L'idée prédominante actuellement est que, dans un avenir proche de cinq à dix ans, la technologie de production de bioéthanol au moyen de l'hydrolyse des matériaux celluloseux représentera cette alternative rêvée. Cependant, de grands obstacles doivent encore être surmontés, et il est difficile de prédire de façon fiable combien de temps vont exiger les développements restants à faire.

Le bioéthanol est produit par hydrolyse et fermentation de matériaux lignocellulosiques depuis la fin du XIX^{ème} siècle, mais ce n'est qu'au cours des 20 dernières années que cette technologie a été proposée pour résoudre la crise des combustibles. Les principaux programmes de recherche et développement sont réalisés aux États-Unis et en Europe, surtout à des échelles de production expérimentales. Leur aboutissement favorable pourrait transformer le bioéthanol en un biocarburant passible d'être produit dans presque toutes les régions du monde, en tirant profit de la grande disponibilité de résidus organiques de diverses sources [Macedo (2005)]. Pratiquement tous les résidus de biomasse, produits dans les activités agricoles et industrielles, de même que les ordures urbaines, présentent des teneurs élevées en matériaux lignocellulosiques.

Les technologies pour l'obtention du bioéthanol à base de matériaux lignocellulosiques impliquent l'hydrolyse des polysaccharides de la biomasse en des sucres fermentescibles, puis leur fermentation pour la production du bioéthanol. Pour exécuter cette tâche, l'hydrolyse utilise des technologies complexes et multiphasiques, à base de solutions acides et/ou enzymatiques pour la séparation des sucres et l'extraction de la lignine. Une configuration générale et simplifiée du processus est présentée à la Figure 19.

Figure 19 – Schéma du processus de production de l'éthanol au moyen de l'hydrolyse de la biomasse



Source : Seabra (2008).

À la différence des processus thermo-chimiques, la composition et la structure de la biomasse a une forte influence sur la nature et sur les rendements des processus d'hydrolyse et de fermentation. En réalité, un grand effort de recherche devra se concentrer exclusivement sur une meilleure compréhension de la formation des composants de la structure végétale et sur la possibilité de les modifier en vue d'augmenter les rendements du processus d'hydrolyse [DOE (2006)], étant donné que l'hydrolyse n'est en fait efficace qu'après séparation des fractions de la biomasse.

La biomasse lignocellulosique est composée de polysaccharides (cellulose et hémicellulose) et de lignine, polymère complexe contenant des groupes méthoxy et phényle propioniques qui maintient les cellules unies. La fraction cellulosique (40%-60% de la matière sèche) est un polymère linéaire du dimère glucose-glucose (cellobiose), rigide et difficile à briser ; son hydrolyse génère du glucose, un sucre à six carbones, dont la fermentation avec *Saccharomyces cerevisiae* est déjà bien connue. A son tour, la fraction hémicellulosique (20%-40%), est constituée, en général, d'une chaîne principale de xylose (liaisons β -1,4) avec diverses ramifications de mannose, arabinose, galactose, acide glucuronique, etc. L'hydrolyse de l'hémicellulose est plus facile que celle de la cellulose, mais la fermentation des sucres à cinq carbones (pentoses) n'est pas encore aussi développée que les processus s'appliquant au glucose. Par ailleurs, la structure biochimique de la lignine (10%-25%) n'a pas de rapport avec des molécules simples de sucre ; il n'est donc pas question de produire du bioéthanol par fermentation de la lignine. Cette fraction joue cependant un rôle fondamental dans le succès de la technologie de l'hydrolyse. En effet et bien qu'il soit possible de produire divers substrats utiles à base de lignine, l'attention des études est actuellement tournée vers l'utilisation de ce matériau comme source d'énergie, ce qui garantirait l'autosuffisance énergétique du process et même, éventuellement, la possibilité d'exporter de l'énergie excédente. Naturellement, cette situation est favorable aussi bien pour la viabilité économique de la technologie que pour les questions environnementales, puisqu'elle réduirait la dépendance à l'égard des ressources énergétiques fossiles externes.

Tableau 20 – Processus pour le pré-traitement de la biomasse pour l'hydrolyse

| Processus | Description | Temps de réaction | Rendement de xylose | Coût* |
|---|--|-------------------|---------------------|-------|
| Physiques | | | | |
| Explosion de vapeur | La biomasse triturée est traitée avec la vapeur (saturée , 160°-260° C) suivie d'une rapide décompression | 1-10 min | 45%-65% | - |
| Thermohydrolyse | Utilise l'eau chaude à haute pression (pressions supérieures au point de saturation) pour hydrolyser l'hémicellulose | 30 min | 88%-98% | - |
| Chimiques | | | | |
| Hydrolyse acide | Au moyen de l'utilisation d'acides sulfurique, chlorhydrique ou nitrique, concentrés ou dilués | 2-10 min | 75%-90% | + |
| Hydrolyse alcaline | Par l'utilisation de bases, comme les hydroxydes de sodium ou de calcium | 2 min | 60%-75% | ++ |
| Organosolv | Un mélange d'un solvant organique (méthanol, bioéthanol et acétone, par exemple) avec un catalyseur acide (H ₂ SO ₄ , HCl) est utilisé pour casser les liaisons internes de la lignine et de l'hémicellulose | 40-60 min | 70%-80% | |
| Biologiques | Utilisation de champignons pour rendre soluble la lignine. Généralement, il est utilisé en combinaison avec d'autres processus | | | |
| Combinés | | | | |
| Explosion de vapeur catalysée | L'addition de H ₂ SO ₄ (ou SO ₄) ou CO ₂ dans l'explosion de vapeur peut augmenter l'efficacité de l'hydrolyse enzymatique, diminuer la production de composés inhibiteurs et promouvoir un retrait plus complet de l'hémicellulose | 1-4 min | 88% | - |
| Afex (<i>ammonia fiber explosion</i>) | Exposition à l'ammonium liquide à haute température et pression pour une certaine période de temps, suivie d'une rapide décompression | | 50%-90% | |
| Explosion de CO ₂ | Similaire à l'explosion de vapeur | | 75% | |

Source : Elaboré sur base de Hamelinck et al. (2005).

* Le signe + indique l'effet avantageux (moindre coût).

D'une manière générale, la première étape de transformation consiste en un pré-traitement mécanique de la matière première, qui vise le nettoyage et la « cassure » du matériau, afin de causer la destruction de sa structure cellulaire et de le rendre plus sensible aux traitements chimiques ou biologiques postérieurs. L'étape suivante consiste au retrait de la lignine et à l'hydrolyse de l'hémicellulose ; elle peut également être nommée « pré-traitement ». Pour cette étape, il existe divers types de process, avec des rendements différents et des effets distincts sur la biomasse, et qui ont, en conséquence, un impact sur les étapes suivantes. Le Tableau 20 présente les méthodes les plus utilisées.

Dans l'étape de l'hydrolyse proprement dite, la cellulose est convertie en glucose, suivant une réaction qui peut être catalysée par un acide dilué, un acide concentré ou des enzymes (cellulase) :



L'hydrolyse acide (acide concentré ou dilué) est effectuée en deux étapes pour tirer profit des différences entre l'hémicellulose et la cellulose. La première comprend essentiellement l'hydrolyse de l'hémicellulose, conduite suivant les conditions du pré-traitement discutées antérieurement. Dans la seconde étape, des températures plus élevées sont appliquées dans le but d'optimiser l'hydrolyse de la fraction cellulosique [Dipardo (2000)]. Le processus avec l'acide dilué requiert des températures et des pressions élevées, avec des temps de réaction allant de quelques secondes à quelques minutes, ce qui facilite l'utilisation de processus continus. Les process avec acide concentré, par contre, sont conduits sous des conditions moins extrêmes, mais avec des temps de réaction typiquement plus longs [Graf e Koehler (2000)]. Le Tableau 21 présente une comparaison entre les différents processus d'hydrolyse.

Tableau 21 – Comparaison des différentes options pour l'hydrolyse de la cellulose

| Processus | Intrant | Température | Temps | Saccharification |
|-----------------|--|-------------|----------|------------------|
| Acide dilué | < 1% H ₂ SO ₄ | 215° C | 3 min | 50%-70% |
| Acide concentré | 30%-70% H ₂ SO ₄ | 40° C | 2-6 h | 90% |
| Enzymatique | Cellulase | 70° C | 1,5 jour | 75%-95% |

Source : Elaboré sur base de Hamelinck et al. (2005).

Dans le processus enzymatique, l'hydrolyse est catalysée par des enzymes appelées génériquement cellulases ; en réalité, il s'agit d'un complexe enzymatique composé d'endoglucanases (qui attaquent les chaînes de cellulose pour produire des polysaccharides plus courts), d'exoglucanases (qui attaquent les terminaux non-réducteurs de ces chaînes plus courtes et enlèvent la cellobiose) et de β-glucosidases (qui hydrolysent la cellobiose et d'autres oligomères au glucose) [Philippidis e Smith (1995)]. Ainsi, comme dans les processus acides, un pré-traitement est nécessaire pour exposer la cellulose à l'attaque des enzymes.

Comme le processus enzymatique est conduit sous des conditions non extrêmes (pH 4,8 et température entre 45° et 50° C), le coût en charges variables est relativement bas [Sun et Cheng (2002)] ; il permet aussi d'obtenir de meilleurs rendements, de réaliser la fermentation en même temps que la saccharification (processus SSF – *simultaneous saccharification and fermentation*) et de présenter un bas coût d'entretien (aucun problème de corrosion). En raison de son grand potentiel d'évolution et de réduction de coûts, de nombreux spécialistes voient l'hydrolyse enzymatique comme la clé pour la production de bioéthanol à un coût compétitif à long terme [Dipardo (2000) e Lynd et al. (1996)].

En comparaison, l'hydrolyse avec acide dilué est à un stade de développement plus avancé que les autres processus, mais elle est handicapée par de graves limites de rendement (50%-70%). L'hydrolyse avec acide concentré présente de meilleurs rendements et moins de problèmes quant à la production d'inhibiteurs, bien que la nécessité de récupération de l'acide et d'investir en équipements résistants à la corrosion remette en cause le rendement économique du processus. L'hydrolyse enzymatique, par contre, présente déjà des rendements élevés (75%-85%), et de grandes améliorations sont encore attendues (85%-95%). En outre, la non-utilisation d'acides peut représenter de grands avantages, non seulement économiques (équipements en matériaux moins chers et coût opérationnel plus bas) mais aussi environnementaux (il n'y a pas de production de résidus). Il est important d'observer que, dans la plupart des cas, ces processus en sont encore à des stades initiaux de développement, avec des expérimentations réalisés à des échelles relativement réduites. Pour des systèmes à taille réelle, avec de grands volumes, les rendements seront naturellement plus faibles.

Indépendamment de la méthode, la fermentation des sucres issus de l'hydrolyse pour donner du bioéthanol suit, basiquement, les mêmes principes que ceux observés dans le cas de la production à base d'amidon ou de sucres. Dans le cas de l'hydrolyse, cependant, une bonne partie de l'hydrolysats est composée de sucres à cinq carbones, qui ne peuvent être fermentés par des souches sauvages de *S. cerevisiae*. A ce jour, la majorité des processus rejette cette fraction des sucres, ou réalise la fermentation en deux étapes, mettant sérieusement en balance sa viabilité économique.

Pour l'avenir, la tendance est que ces transformations puissent se produire simultanément dans un nombre plus réduit de réacteurs, nécessitant donc des microorganismes capables de fermenter les deux sucres avec un rendement élevé. Pour cela, les chercheurs ont eu recours à l'ingénierie génétique, soit pour insérer certaines voies métaboliques des pentose dans des levures ou dans d'autres microorganismes, soit pour améliorer le rendement des microorganismes qui ont déjà la capacité de fermenter les deux sucres. Bien que des succès aient été obtenus dans ces recherches, la fermentation de mélanges de sucres issus de la biomasse n'a pas encore atteint le stade de la viabilité [Galbe e Zacchi (2002), Lynd et al. (2005) e Gray et al. (2006)]. De plus, il est encore nécessaire de prendre en considération les inhibiteurs nuisibles à la fermentation, présents dans l'hydrolysats (acides, furanes, composés phénoliques etc.), qui doivent être retirés lorsque leur concentration est élevée ou qui requièrent l'utilisation de souches robustes de microorganismes résistants.

Dans le cas de l'hydrolyse enzymatique, le processus avec saccharification et fermentation simultanées (SSF) est considéré comme une option « possible » (bien que non encore optimisée), et qui réduirait substantiellement les problèmes d'inhibition. Une évolution de ce processus est d'inclure la co-fermentation de substrats ayant de multiples applications, permettant la consommation de pentoses et d'hexoses dans le même réacteur. Mais pour le moment, cette procédure (SSCF – *simultaneous saccharification and co-fermentation*) est encore testée à une échelle pilote et elle doit encore être l'objet d'un développement sur le moyen terme. L'aboutissement de cette évolution technologique semble être l'établissement du « bioprocessus consolidé » (CBP – *consolidated bioprocessing*), dans lequel les quatre transformations biologiques intervenant dans la production du bioéthanol (production d'enzymes, saccharification, fermentation d'hexoses et fermentation de pentoses) se passent au cours d'une unique étape. Dans ce cas, des microorganismes thermophiles produiraient, en condition anaérobie, des complexes enzymatiques dont l'activité cellulolytique serait meilleure que celle des enzymes typiques des champignons et qui fermenteraient dans un même réacteur tous les sucres libérés [Wyman (2007)].

Face à toutes ces possibilités, il est probable de pouvoir, au fil du temps, augmenter le rendement en bioéthanol, mais, aussi et principalement, réduire les coûts de production. Dans un ample travail prospectif réalisé récemment, Hamelinck et al. (2005), ont estimé que, à court terme, l'hydrolyse enzymatique avec pré-traitement à l'acide dilué atteindra la rentabilité commerciale. Dans ce cas, le processus permettrait de récupérer, sous forme de bioéthanol, près de 35% de l'énergie présente dans la biomasse, rendement atteignant 38% en incluant l'excédent d'électricité. Le coût du bioéthanol serait de 22 €/GJ, en considérant un coût de biomasse de 3 €/GJ et un investissement de 2100 €/kW de bioéthanol (chiffres de 2003). A long terme, sur la base d'une configuration possible du processus CBP, la récupération d'énergie sous forme de bioéthanol pourrait atteindre 47%, soit un total de 52% avec l'excédent d'électricité. Mais le principal avantage attendu est l'énorme réduction du coût du bioéthanol, qui pourrait arriver à 9 €/GJ, en considérant que le coût de la biomasse puisse être ramené à 2 €/GJ et que les besoins en investissement seraient de 900 €/kW de bioéthanol. (Pour ces chiffres, l'énergie considérée se réfère toujours au pouvoir calorifique supérieur, ou PCS).

Le Tableau 22 résume les principaux résultats d'études récentes sur les processus en développement pour la production de bioéthanol par hydrolyse. Les prévisions de disponibilité, présentées à la dernière colonne, ont été estimées, naturellement, à l'époque de la réalisation de chaque étude. Dans ce tableau, les rendements se réfèrent à la production de bioéthanol par tonne de biomasse sèche. Le coût de la biomasse indiqué dans ce même tableau correspond à la valeur adoptée pour le calcul du coût du bioéthanol, facteur défini de forme exogène au processus technologique.

Tableau 22 – Comparaison des estimations de rendements et des coûts pour la production de bioéthanol au moyen de l'hydrolyse

| Référence | Processus | Rendement (litre/t) | Coût de la biomasse | Coût de l'éthanol | Disponibilité |
|-------------------------|---|---------------------|---------------------|--------------------------------|---------------|
| Hamelinck et al. (2005) | SSF avec pré-traitement à l'acide dilué | ~300 | 3 €/GJ | 0,98 €/litre | Court terme |
| | SSCF avec pré-traitement avec explosion de vapeur | ~340 | 2,5 €/GJ | 0,58 €/litre | Moyen terme |
| | CBP avec thermohydrolyse | ~400 | 2 €/GJ | 0,39 €/litre | Long terme |
| Aden et al. (2002) | SSCF avec pré-traitement à l'acide dilué. | 374 | 33 US\$/t | 0,28 US\$/litre (prix minimum) | Court terme |
| Wooley et al. (1999) | SSCF, avec pré-traitement à l'acide dilué | 283 | 44 US\$/t | 0,38 US\$/litre | Court terme |
| | Idem | 413 | 28 US\$/t | 0,20 US\$/litre | Long terme |

Source : Seabra (2008).

Indépendamment de la solution technologique, il est important de noter l'énorme poids du coût de la biomasse sur le coût final du bioéthanol. En général, dans les estimations faites pour les pays de l'hémisphère nord, le coût de la biomasse représente près de 40% du coût du bioéthanol, et une grande partie des réductions du coût du biocarburant pour l'avenir se base sur la réduction de la valeur de la biomasse. Evidemment, ceci crée de grandes attentes quand on considère le cas d'autres régions de la planète, pour lesquelles il existe des options de biomasse à des coûts bien plus bas. Un exemple est la biomasse de la canne au Brésil, dont le coût de la paille est évalué au départ à près de 1 US\$/GJ [Hassuani et al. (2005)], tandis que la bagasse a un coût zéro en ce qui concerne les facteurs de production. Naturellement, en intégrant ses utilisations alternatives, la bagasse peut être correctement mise en valeur via la production d'énergie électrique, comme cela a été détaillé au chapitre antérieur.

Au Brésil, la technologie de l'hydrolyse a également été développée dans des recherches appliquées et a atteint un stade relativement avancé. Depuis quelques années, dans un projet soutenu par la Fondation d'Appui à la Recherche de l'État de São Paulo (Fapesp) et par le

Centre de Technologie de la Canne à Sucre (CTC), la société Dedini Indústrias de Base teste à une échelle –pilote un processus de production de bioéthanol à base de bagasse et, éventuellement, de paille de canne, au moyen d'un traitement dénommé Organosolv combiné avec une hydrolyse à l'acide dilué. Dans ce projet, une unité de capacité journalière de 5 mille litres de bioéthanol est en fonctionnement dans une usine de sucre et de bioéthanol, avec pour objectif de déterminer les paramètres d'ingénierie de ce processus pour le dimensionnement d'unités de plus grande taille [Dedini (2008)].

Dans ce processus, breveté sous le nom de DHR (Dedini Hydrolyse Rapide), le solvant (éthanol) déstructure le complexe cellulose-hémicellulose-lignine, en dissolvant la lignine, hydrolysant l'hémicellulose et en exposant la cellulose à l'action d'acide sulfurique, qui promeut rapidement (10 à 15 minutes) l'hydrolyse de cette fraction, à des températures 170° à 190° C et des pressions de l'ordre de 25 bar. Il s'agit d'un processus continu, qui opère depuis 2003 de mode uniforme et stable. Bien qu'il y ait encore des points à perfectionner, des défis complexes ont déjà été surmontés comme l'alimentation continue en bagasse des réacteurs sous pression élevée et la sélection de matériaux compatibles avec des sollicitations mécaniques sévères dans des ambiances très corrosives. Comme dans ce processus, la fraction des pentoses n'est pas mise à profit, les rendements sont relativement bas, de l'ordre de 218 litres de bioéthanol par tonne de bagasse sèche ; à l'avenir, des niveaux proches de 360 litres par tonne de bagasse devraient être atteints, grâce à l'utilisation de cette fraction des sucres [Rossell e Olivério (2004)].



Usine-pilote de Dedini pour la production d'éthanol à base de bagasse.

Plus récemment, Petrobras a pris l'initiative d'installer au Cenpes, son Centre de recherches de Rio de Janeiro, un réacteur à hydrolyse enzymatique ; à l'initiative du Ministère de la Science et de la Technologie, une autre plateforme pour l'hydrolyse enzymatique de la bagasse de canne à échelle-pilote est en voie d'installation à Campinas (SP) auprès du Centre de Science et Technologie du Bioéthanol, installé récemment. Cette plateforme fait suite à un projet à l'échelle de laboratoire, réunissant 20 unités de recherche au Brésil avec des partenariats à l'étranger et une centaine de chercheurs d'universités et de centres de recherche brésiliens.

De manière générale, beaucoup de résultats ont déjà été obtenus dans le développement de la technologie de l'hydrolyse, mais il reste d'importants défis à relever pour la mise en oeuvre effective d'unités commerciales et compétitives utilisant ce processus. Comme les ressources disponibles sont limitées, il est essentiel d'évaluer ce qui est réellement vital pour la consolidation de la technologie. En ce sens, ces dernières années, des souches de microorganismes adaptés ont été développées, et les principales opérations intervenant dans le processus ont été modélisées et optimisées, mais toutefois encore à l'échelle réduite de réacteurs expérimentaux où le contrôle des températures et des conditions d'asepsie est plus facile. Bien qu'il n'y ait pas encore de consensus sur la meilleure option technologique pour la production du bioéthanol à l'aide de ces solutions innovantes, les chercheurs de par le monde réclament la construction des premières usines commerciales afin de permettre l'obtention des gains tant attendus par l'apprentissage [Lynd et al. (2005), Zacchi (2007) e Wyman (2007)].

5.2 Gazéification pour la production de combustibles et d'électricité

La gazéification est un processus de conversion thermo-chimique de la biomasse, réalisé à des températures élevées, dans lequel les substances organiques (solides ou liquides) sont converties en produits gazeux, principalement CO, H₂, CO₂ et en vapeur d'eau, avec formation de produits secondaires comme des hydrocarbures légers et d'autres composés volatiles récupérables par condensation [Grabowski (2004)]. Les constituants inorganiques de la biomasse sont éliminés sous la forme de cendres. Le processus peut être effectué au moyen d'une réaction du matériau organique avec l'oxygène de l'air ou de la vapeur, ou encore, avec de l'oxygène pur, et des réacteurs à pression atmosphérique ou pressurisés peuvent être utilisés. Le chauffage du gazéificateur peut être fait de manière directe, par l'oxydation partielle de la biomasse, ou indirecte, au moyen de mécanismes d'échange de chaleur. Le type de réacteur peut correspondre à des gazéificateurs à lit fixe, fluidisé ou entraîné. Ainsi, la gazéification peut s'effectuer selon des systèmes assez diversifiés, à choisir en fonction de la biomasse à traiter, du type de produit recherché et de la taille de l'unité.

Les réactions qui se produisent dans un gazéificateur sont assez complexes et l'efficacité du processus dépend d'une mise au point adéquate. Pour donner une idée simplifiée du processus de gazéification, suite à la volatilisation du combustible solide, se produisent simultanément les réactions ci-après [Rauch (2002)] :



Grâce à la gazéification, il est possible de transformer un matériau hétérogène, comme c'est le cas de la biomasse, en un combustible gazeux adapté à diverses applications. Pour certaines utilisations, ce gaz doit cependant être nettoyé avec soin pour atteindre les standards requis pour son utilisation finale. Le nettoyage peut se faire à basse température, par exemple, au moyen d'une filtration (qui s'effectue aux alentours de 200° C) et d'un lavage, pour le retrait de particules et d'éléments condensables, après un refroidissement préalable. Le nettoyage peut être réalisé également à une température moyenne à élevée (350°-400° C), pour une utilisation dans des turbines à gaz et des cellules à combustible. En général, ce nettoyage à chaud est fait en employant des filtres céramiques [Macedo et al. (2006)].

La gazéification de la biomasse s'est développée depuis la décennie de 1940, conduisant à la création de différents types de gazéificateurs et de diverses adaptations du processus et applications. Quant aux appareils, il y en existe de petits, pour la fourniture de gaz à des moteurs automobiles à combustion interne, et aussi pour des petites applications en poste fixe fournissant une combinaison de chaleur et de puissance (CHP). En outre, des systèmes à plus grande échelle ont aussi été étudiés afin de fournir la puissance de turbines à gaz thermiques de 10 MW à 100 MW, et, plus récemment, pour des systèmes qui produisent un gaz adapté à la synthèse de combustibles liquides (méthanol, liquides par Fischer-Tropsch, bioéthanol, DME etc.).

Dans ce domaine, un grand nombre des besoins de développement ont déjà été identifiés et, en partie, résolus au cours de la décennie de 1990, comme par exemple l'adaptation de l'alimentation de biomasse « libre » à une large échelle dans des réacteurs pressurisés, le développement de systèmes de nettoyage du gaz pour atteindre la qualité requise, et d'autres besoins spécifiques en rapport avec les processus postérieurs d'utilisation du gaz produit (comme les turbines à gaz utilisant des gaz à faible pouvoir calorifique, les réacteurs de synthèse utilisant le gaz de biomasse pour la production de liquides). Cette voie de synthèse de combustibles peut bénéficier de l'expérience acquise par l'industrie des combustibles fossiles, mais la plus grande complexité du processus impose des développements additionnels.

Dans l'avenir, il est envisagé que la gazéification de la biomasse puisse rendre viable aussi bien la production de biocarburants liquides, principalement pour des usages dans le secteur automobile, que la production de bioélectricité à grande échelle, comme cela est présenté dans les prochains paragraphes. Le facteur principal qui fournit l'impulsion à ce développement technologique est évidemment la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de remplacer la consommation de dérivés du pétrole. Malgré l'expérience déjà acquise dans quelques usines de démonstration, les efforts de recherche et développement n'ont pas été constants au long des années, et pour cette raison, il est estimé que ces technologies ne deviendront des options mûres au niveau commercial qu'à moyen ou long terme, c'est-à-dire, dans plus de dix ans. Mais, pour que cela puisse se produire effectivement, beaucoup d'efforts sont encore nécessaires dans le domaine de la recherche et du développement, ainsi que pour la définition et la mise en oeuvre de politiques d'encouragement adaptées.

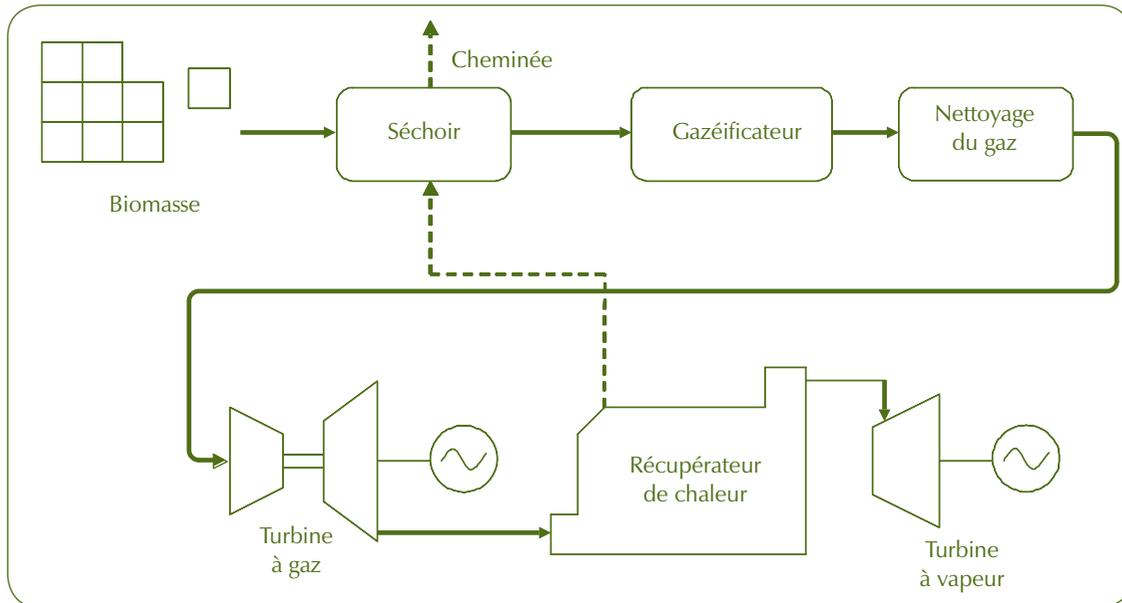
Gazéification de la biomasse intégrée à cycles combinés (technologie BIG/GT-CC)

La gazéification est considérée comme une technologie cruciale pour faciliter la conversion efficace, propre et à bas coût, de la biomasse en bioélectricité. Cette technologie permet de mettre en oeuvre l'utilisation de biomasse dans les turbines à gaz, dont le cycle thermique de puissance permet aux fluides de travailler à des températures moyennes bien plus élevées (au-dessus de 1.200° C) que dans les cycles conventionnels à vapeur (en-dessous de 600° C), ce qui réduit les pertes thermodynamiques et augmente au maximum le rendement. En ce sens, il est attendu espère que la technologie de la gazéification de la biomasse intégrée à des cycles combinés de turbines à gaz/turbines à vapeur (*biomass integrated gasification/gas turbine combined cycle* – BIG/GT-CC) soit capable de viabiliser et d'ouvrir un large champ pour l'application de la biomasse solide dans la production d'énergie électrique. Dans le cas des gazéificateurs, des volumes de gaz plus réduits doivent être nettoyés (en comparaison avec la combustion directe de la biomasse) et les turbines à gaz, associées aux cycles à vapeur (cycle combiné), offrent une efficacité élevée dans la production d'électricité pour des coûts spécifiques en investissement limités.

Le concept de base de la technologie BIG/GT-CC comprend le pré-traitement de la biomasse, suivi de la gazéification, du refroidissement, du nettoyage du gaz et de sa combustion dans une turbine. À travers un récupérateur de chaleur, les gaz chauds sortant de la turbine à gaz produisent de la vapeur, qui est utilisée dans un cycle à vapeur pour la production d'électricité supplémentaire. En outre, après avoir été utilisés pour la production de vapeur, les gaz d'échappement à basse température peuvent encore être utilisés pour le séchage de la biomasse, rendant ainsi possible une intégration complète du système [Faaij et al. (1998)]. La Figure 20 montre une représentation schématique d'un système BIG/GT-CC.

Trois variantes peuvent être utilisées pour appliquer ce concept de base de gazéifier la biomasse et d'utiliser le gaz des turbines à gaz. Les principales différences tiennent au type de gazéificateur. Une variante se base sur la technologie de lit fluidisé circulant (*circulating fluidized bed* – CFB), où le gazéificateur opère à pression atmosphérique et avec injection d'air

Figure 20 – Représentation schématique d'un système BIG-CC



Source : Elaboré sur base de Larson et al (2001).

pour la fourniture de l'oxygène nécessaire aux réactions de gazéification. La société suédoise TPS – Termiska Processer AB, qui a accumulé une bonne expérience dans la gazéification utilisant cette technologie, propose des systèmes BIG/GT-CC avec insertion d'un réacteur immédiatement en aval du gazéificateur, pour le craquage du goudron, substance gênante qui rend difficile le nettoyage des gaz. La seconde variante se base sur un gazéificateur avec chauffage indirect et opérant sous des pressions proches de la pression atmosphérique. Dans ce cas, le modèle le plus remarquable du point de vue de la gazéification est celui du Battelle Columbus Laboratory (BCL), aux États-Unis, dans lequel du sable est utilisé pour chauffer la matière organique. La troisième variante emploie la technologie de gazéification sur lit fluidisé circulant mais en opérant à des pressions élevées (20-30 bar, 900°-1.000° C). L'entreprise américaine Foster Wheeler et la finlandaise Carbona sont réputées pour cette technologie [Consonni e Larson (1996) e Larson et al. (2001)].

En ce qui concerne les rendements, diverses études ont été publiées, au long des années, afin d'estimer l'efficacité et les coûts de la bioélectricité, sous l'hypothèse que tous les problèmes technologiques aient été résolus. Cependant, il existe encore des barrières importantes à franchir, comme : l'alimentation et le fonctionnement de gazéificateurs pressurisés de grande capacité ; le nettoyage du gaz avec craquage complet du goudron ; la séparation des sels alcalins et des éléments en particules dans le gaz produit ; la modification des turbines à gaz pour utiliser des gaz à bas pouvoir calorifique (ceci afin d'obtenir une efficacité équivalente à celle des turbines à gaz naturel et d'utiliser les développements industriels de ces turbines

pour réduire les coûts en capital). Sur ce point, il est estimé que l'efficacité pour la production d'énergie électrique devra se situer autour de 45%, pour des coûts d'énergie électrique produite se situant entre 40 US\$/MWh et 60 US\$/MWh, comme le montre le Tableau 23, en fonction du coût de la biomasse et de l'option de gazéification utilisée [Jin et al. (2006)]. (voir Tableau 23)

Tableau 23 – Comparaison des estimations de rendement et de coûts des systèmes BIG/GT-CC

| Référence | Technologie de gazéification | Efficacité relative au PCI | Investissement (US\$/kW) | Coût de la biomasse (US\$/GJ) | Coût de l'énergie électrique (US\$/MWh) |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|
| Jin et al. (2006) | Atmosphérique avec chauffage indirect | 43,8% | 968 | 3,0 | 55 |
| | Pressurisée avec injection d'oxygène | 45% | 1.059 | 3,0 | 52 |
| Faaij et al.* (1998) | CFB pressurisée | 54% | 1.950 | 4,0 | 80 |
| Consonni e Larson (1996) | Atmosphérique avec chauffage direct | 41,9% | 1.500 | 2,0 | 49 |

Source : Adapté de Seabra (2008).

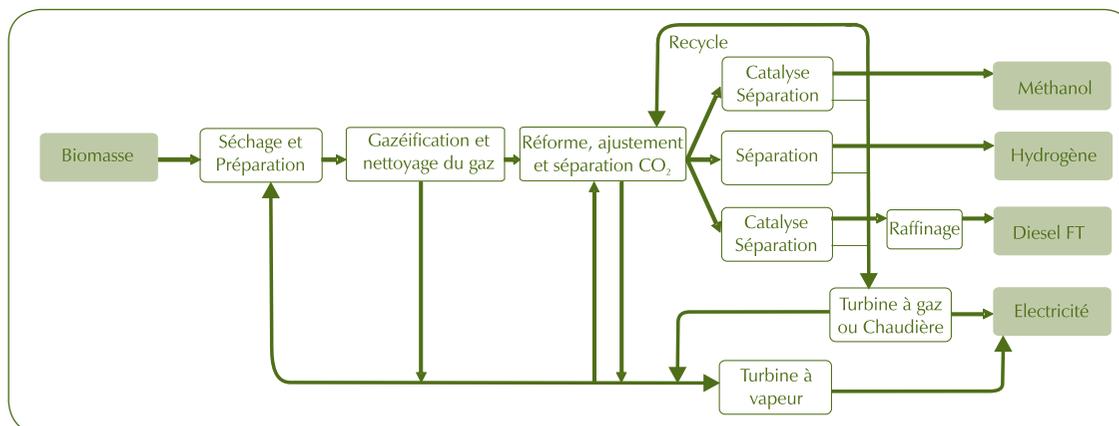
* Les montants originaux en florins hollandais ont été convertis au taux de US\$ 1,00 = Dfl 2,00.

Les 15 dernières années ont été marquées par un effort considérable de recherche et de développement technologique pour la gazéification de la biomasse associée à l'utilisation de turbines à gaz. Cependant, bien que divers projets aient été envisagés durant cette période, une seule installation a été effectivement construite et opère depuis un temps significatif. Elle est située, à Värnamo, en Suède, et utilise la technologie TPS. Un projet avait été prévu au Brésil, à l'intérieur de la Bahia, avec la construction d'un système BIG/GT-CC de 30-32 MW de puissance électrique utilisant le bois d'eucalyptus comme combustible, mais il n'a finalement pas vu le jour. L'alternative la plus plausible, bien qu'encore assez improbable, serait l'utilisation de systèmes BIG-CC intégrés dans des usines de sucre et de bioéthanol, car le bas coût de la biomasse favoriserait la viabilité du processus. Cette alternative avait fait l'objet de recherche à partir de 1997 dans l'ancien Centre de Technologie de Copersucar (actuellement, Centre de Technologie de la Canne à sucre), en partenariat avec la société TPS. Mais, pour le moment, la construction d'une unité de démonstration, étape suivante de ce projet, ne fait l'objet que de spéculations [Hassuani et al. (2005)].

Synthèse de combustibles

Divers biocarburants, comme les « liquides issus de la réaction Fischer-Tropsch » (essence FT et diesel FT), l'hydrogène, le méthanol, l'éthanol, et le DME (diméthyl éther), peuvent être obtenus à partir du gaz de synthèse produit par la biomasse. Dans ce processus, la gazéification de la biomasse donne naissance au gaz de synthèse, qui doit passer par des processus de nettoyage, de réforme et, si nécessaire, de réglage de composition, pour être alors transformé en combustible dans un réacteur propre. Comme tout le gaz n'est pas converti en combustible, il est possible de recycler cette partie non-convertie (pour une production maximum de combustible) ou, simplement, de la brûler pour produire de l'énergie électrique (dans un système BIG/GT-CC, par exemple). Cette dernière option est connue sous le nom de *once-through* et est considérée comme la plus rentable dans les cas où l'électricité peut être vendue [Hamelinck et al. (2001), Hamelinck et al. (2003) e Larson et al. (2005)]. La Figure 21 présente un diagramme général de la production de certains de ces combustibles.

Figure 21 – Fluxogramme général pour la production de méthanol, d'hydrogène et de diesel via gazéification de biomasse (Fischer Tropsch)



Source : Elaboré sur base de Hamelinck (2004).

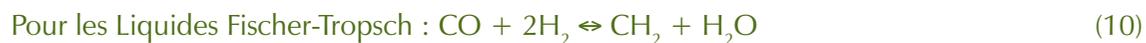
Dans la production de combustibles liquides à l'aide de cette technologie, l'échelle de production est un facteur déterminant pour la rentabilité économique du processus, raison pour laquelle la technologie de gazéification CFB pressurisée est préférable, selon certains auteurs [Hamelinck et al. (2003), Larson et al. (2005) e Hamelinck et al. (2001)]. La gazéification doit être conduite de telle sorte que le gaz obtenu soit riche en CO et H₂, qui sont les principaux réactifs pour la production des combustibles liquides. L'injection d'air doit être évitée, car il n'est pas souhaitable que le gaz produit soit dilué par de l'azote.

Comme le gaz produit peut contenir des quantités considérables de méthane et d'autres hydrocarbures légers, une option consiste à réaliser une réforme, c'est-à-dire à convertir, à une

température élevée et en présence d'un catalyseur (généralement du nickel), ces composés en CO et H₂. Un autre point important est le rapport H₂/CO, qui doit être ajusté pour chaque type de biocarburant, une réduction de la proportion avec moins d'hydrogène orientant vers la production pour de combustibles plus lourds, comme le diesel. Cet ajustement est fait par la réaction de changement entre eau et -gaz, développée en présence d'un catalyseur à base de fer [Van der Laan (1999)] :



Les réactions de base intervenant dans la production de chaque combustible sont les suivantes [Larson et al. (2005)] :



Quant aux réacteurs, il existe trois conceptions de base [Larson et al. (2005)] : lit fixe (phase gazeuse), lit fluidisé (phase gazeuse) et lit de boue (phase liquide). Le premier concept donne de faibles taux de conversion avec seulement un passage, et permet difficilement d'en retirer de la chaleur. Le second, à son tour, permet d'atteindre des taux de conversions plus importants, mais sa mise en oeuvre est plus complexe. Le dernier est celui qui présente les plus hautes conversions de tous les processus à un seul passage.

L'étape actuelle de développement de cette technologie donne lieu, surtout en Europe, à la construction et la mise en service de projets démonstratifs et même de quelques projets commerciaux. Ces dernières années, sur la base de l'expérience acquise avec les gazéificateurs de biomasse et celle de l'industrie pétrolière de synthèse, différentes analyses ont été réalisées pour évaluer les possibilités et les perspectives de coûts de ces biocarburants. Dans le cas des liquides FT (essence et diesel), par exemple, il est estimé que, une fois tous les problèmes technologiques résolus, les rendements globaux pourront dépasser 57%, en considérant la production combinée de combustibles (34% de rendement) et d'électricité (23% de rendement). Le coût du biocarburant serait d'un peu plus de 15 US\$/GJ, pour un coût de biomasse de 50 US\$/t et un investissement un peu supérieur à 1.770 US\$/kW de combustible produit [Larson et al. (2006)]. A titre de comparaison, le coût du diesel conventionnel est d'environ 7 US\$/GJ, avec un baril de pétrole à US\$ 30 [Macedo (2005)]. Le Tableau 24 présente quelques valeurs, obtenues dans la littérature, avec des rendements et des coûts de biocarburants liquides produits au moyen de processus de synthèse associés à des gazéificateurs de biomasse.

Tableau 24 – Comparaison des rendements et des coûts pour la production de combustibles de synthèse

| Référence | Combustible | Rendement (litre/t sèche) | Investissement | Coût de la biomasse | Coût du combustible |
|-------------------------|-------------|---------------------------|--|---------------------|---------------------------------|
| Phillips et al. (2007) | Ethanol | 303 | 0,82 US\$/litro/anna | 35 US\$/t | 0,26 US\$/litre |
| Larson et al. (2006) | Liquides FT | 138 | 1.774 US\$/kW _{comb, PCI} | 50 US\$/t | 15,3 US\$/GJ _{PCI} |
| | DME | 468 | 1.274 US\$/kW _{comb, PCI} | 50 US\$/t | 13,8 US\$/GJ _{PCI} |
| Hamelinck et al. (2002) | Méthanol | 280-630 | 930-2.200 US\$/kW _{comb, PCS} | 2 US\$/GJ | 8,6-12,2 US\$/GJ _{PCS} |

Source : Seabra (2008).

Comme déjà indiqué, la préoccupation liée à l'émission de GES et les coûts du pétrole ont conduit à rechercher des méthodes alternatives pour produire des combustibles liquides à base de biomasse, avec une utilisation la plus limitée possible d'énergie fossile, voir même, en utilisant la captation et séquestration du C émis. Une autre proposition relativement récente [Williams et al. (2005)] est l'utilisation de la gazéification de la biomasse conjointement avec du charbon, dans un système « hybride », dans lequel la biomasse serait utilisée à un niveau suffisant pour réduire de manière significative les émissions de GES du cycle thermique.

Pour tous les systèmes bioénergétiques innovateurs utilisant les gazéificateurs, les analyses ont montré qu'il serait essentiel, pour en assurer la rentabilité, de valoriser économiquement leur potentiel d'atténuation du changement de climatique (calculs effectués pour un prix du baril de pétrole de US\$ 30). Cependant, au vue des valeurs du baril de pétrole observés ces dernières années et en comptant sur des gains technologiques et sur efforts accrus durant les phases de développement et de démonstration de cette technologie, il est possible d'envisager l'existence de systèmes commercialement rentables dans un délais plus court.

Outre les solutions de l'hydrolyse et de la gazéification présentées aux paragraphes antérieurs, technologies assez bien connues et ayant des perspectives croissantes d'être économiquement viables à moyen terme, d'autres possibilités existent. Une fois confirmée leur factibilité technique à des échelles commerciales de production, elles pourront également ouvrir, à moyen terme, de nouvelles frontières pour l'utilisation énergétique de la canne à sucre. Parmi ces possibilités encore à l'étude se trouve la production de butanol (C₄H₈O). Fabriqué actuellement dans des usines pétrochimiques et utilisé largement comme solvant industriel, il serait obtenu au moyen de solutions biochimiques employant des matériaux lignocellulosiques comme matière première. Ce butanol pourrait être utilisé comme additif à l'essence, en des teneurs élevées et affectant peu la consommation spécifique [DuPont (2008)]. Une autre solution, suggérée récemment, est la production de biodiesel au moyen

de processus biochimiques utilisant des sucres comme substrat. Cette solution a même fait l'objet de présentation de projets de mise en oeuvre d'unités industrielles auxquelles participeraient la société détentrice de la technologie et des sociétés brésiliennes [Amyris (2008)]. Certainement, ce sont là des possibilités intéressantes et s'appuyant sur de bonnes bases technologiques, mais il reste encore à démontrer leur viabilité économique et à mieux connaître les rendements des processus et les coûts, fixes et variables, obtenus.

5.3 Utilisation de bioéthanol comme intrant pétrochimique ou alcool chimique

Avec leur large gamme de caractéristiques et d'applications possibles, les matériaux plastiques – terme qui désigne, génériquement, une famille diversifiée de polymères artificiels – jouent un rôle fondamental dans notre vie moderne, que ce soit en substituant des matériaux traditionnels, comme le verre et le bois, ou en offrant de nouvelles utilisations dans le domaine des emballages, des matériaux de revêtement et des matériaux de construction, entre autres possibilités. Pour approvisionner ce marché, l'industrie pétrochimique conventionnelle utilise essentiellement comme intrants le gaz naturel et le goudron (naphte) de pétrole. Des réactions chimiques complexes, groupées habituellement en trois étapes permettent de synthétiser ces produits : a) les industries de première génération, qui fournissent les produits pétrochimiques de base, comme l'éthène (ou éthylène, C_2H_4), le propène (ou propylène, C_3H_6) et le butadiène ; b) les industries de la seconde génération, qui transforment les produits pétrochimiques de base en « pétrochimiques finaux », comme le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), les polyesters et l'oxyde d'éthylène ; et c) les industries de la troisième génération, où les produits finaux sont chimiquement modifiés ou transformés en produits de consommation, comme les films, les récipients et les objets.

Le bioéthanol est une substance homogène et réactive, qui peut être effectivement utilisée comme intrant dans divers processus traditionnellement pétrochimiques ; ils pourraient, dans ce cas, être dénommés « alcool-chimiques ». Les principaux processus utilisés dans la transformation du bioéthanol peuvent être classés, comme indiqué au Tableau 25, en soulignant cependant l'étape de production d'éthène, par déshydratation du bioéthanol, qui est le précurseur d'une large gamme de produits de seconde génération, comme le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le polychlorure de vinyle (PVC). Sur la base de l'équation de déshydratation du bioéthanol et d'une efficacité de conversion de 95%, la production d'1 kg d'éthène requière la consommation de 1,73 kg (ou 2,18 litres) de bioéthanol.

Par déshydrogénation du bioéthanol en acétaldéhyde, il est possible d'obtenir une autre classe d'intermédiaires de grand intérêt, les butadiène et polybutadiène, qui sont des composants de base des caoutchoucs synthétiques utilisés pour diverses applications, dont les pneumatiques. Pratiquement tous les produits énumérés au Tableau 25 sont utilisés cou-

ramment dans les secteurs industriel (peintures, solvants et adhésifs), agricole (fertilisants et produits phytosanitaires) et de consommation finale (par exemple, en fibres textiles). Par sa conversion dans des industries de première génération ou de seconde génération, le bioéthanol peut effectivement être considéré comme une matière première pour l'obtention d'une large gamme de produits traditionnellement pétrochimiques.

Tableau 25 – Processus de base de l'industrie alcool-chimique

| Processus | Principaux produits | Application typique |
|------------------------------------|---------------------|---|
| Déshydratation | Ethène | Résines plastiques |
| | Propène | Solvants |
| | Ethylèneglycol | Éther éthylique Fibres textiles |
| Déshydrogénation Oxygénation | Acétaldéhyde | Acide acétique |
| | | Acétates Colorants |
| Stérification | Acétates | Solvants |
| | Acrylates | Fibres textiles Adhésifs |
| Halogénéation | Chlorure d'éthyle | Fluides réfrigérants |
| | | Produits médicaux Résines plastiques |
| Ammonolyse | Diéthylamine | Insecticides |
| | Monoéthylamine | Herbicides |
| Déshydrogénation Déshydratation | Butadiène | Caoutchoucs synthétiques |

Source : Elaboré sur base de Schuchardt (2001).

Les marchés concernés par ces utilisations de bioéthanol sont importants. Il est évalué que la demande de bioéthanol comme intrant pour l'industrie chimique et pétrochimique brésilienne pourrait atteindre 7 millions de mètres cubes [Apla (2006)], soit environ un tiers de la production de la récolte 2006/2007. La production de ces secteurs au Brésil représentant près de 3% de la production mondiale, il est évident qu'il y a un grand potentiel pour l'emploi du bioéthanol de canne à sucre comme matière première à une échelle mondiale. En considérant seulement la demande mondiale d'éthylène, de 105 millions de tonnes en 2005 [CMAI (2005)], et une pénétration de 10% du bioéthanol en substitution d'autres intrants, la demande serait de 23 milliards de litres, chiffre du même ordre de grandeur que la production brésilienne actuelle. Le facteur décisif pour le développement de ce marché est le prix relatif du bioéthanol face aux autres intrants, puisque les technologies de base sont essentiellement maîtrisées.

Premiers pas de l'éthanol-chimie au Brésil

Durant la décennie de 1980, des projets qui mettaient en oeuvre l'utilisation de l'éthanol pour substituer les matières premières fossiles dans l'industrie pétrochimique brésilienne furent menés avec succès par Oxiteno et par la Compagnie Pernambucana de Borrachas (Coperbo). A cette période, la consommation de bioéthanol comme matière première fut de 500 millions de litres annuels [Pádua Rodrigues (2005)]. Ces voies de production furent abandonnées à partir de 1985 à cause de la configuration défavorable des prix, mais elle fonda actuellement l'objet d'un regain d'intérêt du fait du coût élevé des intrants fossiles. Dans le cas de Oxiteno, bras pétrochimique du groupe Ultrapar, le bioéthanol de canne fut utilisé régulièrement comme matière première dans son unité de Camaçari, dans la Bahia, dans la première moitié des années 1980, pour une production annuelle d'éthylène estimée à 230 mille tonnes. Actuellement, cette entreprise investit une part significative de ses ressources propres dans le développement de technologie de processus pétrochimiques et alcool-chimique, avec divers brevets internationaux déposés, en particulier dans la production de catalyseurs (qui sont essentiels pour la conversion de l'éthanol en éthylène et en d'autres précurseurs). En outre, elle s'est mobilisée pour développer la production d'éthanol par hydrolyse de la cellulose et mettre en oeuvre des bioraffineries, reconnaissant explicitement leur intérêt dans la fourniture de matière première pour ses unités de production d'éthylène et d'éthylèneglycol [Inovação Unicamp (2006) e BNDES (2007)].

Coperbo a une plus longue histoire dans le bioéthanol et la production d'intrants chimiques. En septembre 1965, cette entreprise a mis en production une unité de butadiène, à Cabo (PE), fabriquant 27,5 mille tonnes annuelles de caoutchoucs synthétiques à base d'éthanol, ceci afin de répondre à la demande croissante de cet élastomère seulement partiellement fourni par la production nationale de caoutchouc naturel. Toutefois, avec la libération de l'exportation des mélasses et de l'importation de caoutchouc naturel par le gouvernement de l'époque, cette industrie a eu des difficultés à fonctionner par manque d'éthanol pour sa production de caoutchouc. En 1971, le contrôle actionnarial de Coperbo fut transféré à Petroquisa, ce qui améliora sa condition financière et lui donna une nouvelle impulsion, conjointement à l'augmentation de la production d'éthanol à partir de 1975. La ligne de produits incluait l'acide acétique et l'acétate de vinyle, composants qui finirent par justifier la création de la Companhia Alcooquímica Nacional, dont le contrôle fut assumé postérieurement par l'Union Carbide, entreprise commandée actuellement par Dow Chemical [Jornal do Comercio (1999)]. Le niveau de fonctionnement actuel de cette industrie, qui durant quelques années a produit, à partir d'éthanol, du butadiène, utilisé principalement dans la fabrication de pneus à une échelle commerciale, n'est pas connu.

5.4 Production de plastiques biodégradables

En 2004, la production mondiale de plastiques fut de 230 millions de tonnes, chiffre qui devrait atteindre presque 300 millions de tonnes en 2010 [Dröscher (2006)]. Mais cet énorme marché, en croissance, suscite une grande préoccupation environnementale, car la rapidité avec laquelle les plastiques sont jetés et leur difficile dégradation dans l'environnement ont entraîné une inflation accélérée des résidus. Après utilisation, moins de 10% des plastiques sont recyclés, la grande majorité étant destinée aux décharges physiques [Waste-online (2008)], ce qui va exiger de la nature environ de 100 à 500 ans pour leur dégradation complète.

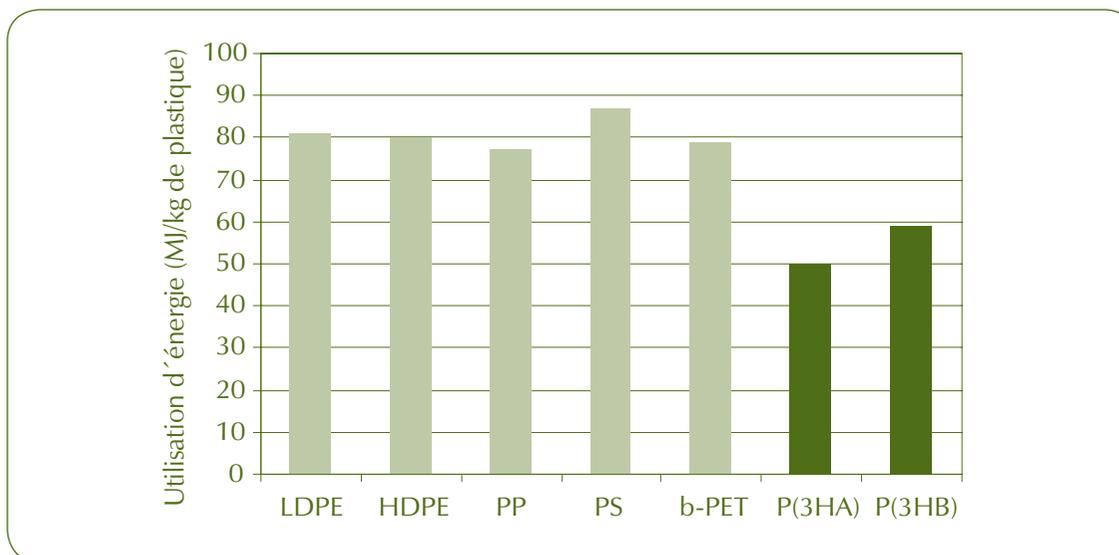
Outre l'augmentation du recyclage, une autre option efficace pour contourner ce problème est l'utilisation des plastiques biodégradables. Les plastiques biodégradables sont des polymères qui, sous des conditions environnementales appropriées, se dégradent complètement par l'action microbienne dans un court espace de temps. Et dans le cas des bioplastiques, il existe encore un avantage important du fait qu'ils sont produits à partir de sources renouvelables, comme l'amidon, les sucres ou les acides gras. Un exemple de bioplastique est l'acide polylactique (PLA), composé de monomères d'acide lactique, obtenu par la fermentation microbienne. Une autre possibilité est l'obtention de biopolymères produits directement par des microorganismes, comme c'est le cas du PHB (polyhydroxybutirate), du PHA (polyhydroxyalcanoates) et de leurs dérivés ; dans ces cas, le biopolymère est biosynthétisé par les microorganismes comme matériau de réserve énergétique.

Le premier rapport d'étude sur les bioplastiques a été rédigé dans la décennie de 1920, mais le sujet a sommeillé jusqu'à la moitié des années 1970, quand les crises du pétrole stimulèrent la recherche de sources alternatives de matériaux et d'énergie. Actuellement, les structures ainsi que les voies biosynthétiques et les applications des nombreux bioplastiques sont assez bien connus, mais il existe encore d'importantes contraintes à une production à grande échelle ; par exemple les conditions spéciales de croissance requises pour la synthèse de ces composés, la difficulté de les synthétiser au moyen de précurseurs à bas coût, et les coûts élevés de leur extraction. Même avec l'utilisation de microorganismes recombinants capables de fermenter des sources de carbone à bas coût (e.g. mélasse, saccharose, huiles végétales et méthane), ces processus ne sont pas encore compétitifs comparés à la production conventionnelle de plastiques synthétiques [Luengo et al. (2003)].

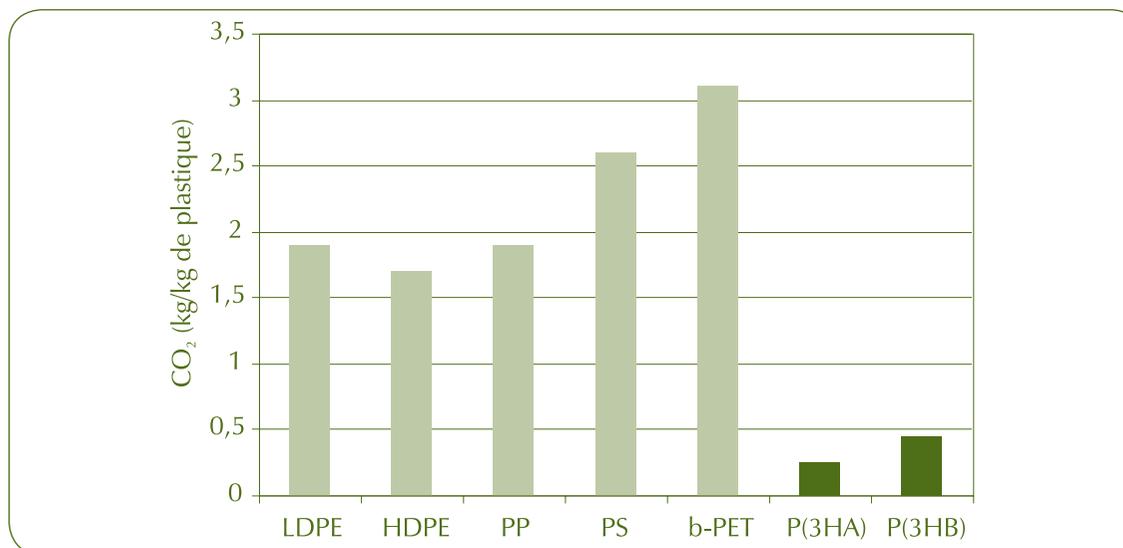
Outre les questions économiques, il est aussi important que le bilan énergétique dans le cycle de vie de ces biopolymères soit positif, car ils devront également être pris en compte comme substituts des matériaux pétrochimiques. Normalement, les gains en énergie sont faibles, car la fourniture d'énergie se base en général sur l'utilisation de combustibles fossiles. Dans ce cas, une fois encore, les matériaux dérivés de la canne offrent un avantage, grâce à l'utilisation de la bagasse. Le Graphique 15 présente une comparaison de la consommation d'énergie et des émissions de GES pour la production de divers plastiques, y compris les matériaux d'origine fossile – polyéthylène de basse densité (LDPE), polyéthylène de haute

densité (HDPE), polypropylène (PP), polystyrène (PS) et le polytéréphtalate d'éthyle (b-PET) – et deux polyesters co-polymériques produits à base de biomasse : P(3HA), à base d'huile de soya, et P(3HB), à base de glucose [Akiyama et al. (2003)].

Graphique 15 – Utilisation de l'énergie (a) et émissions de GEE (b) pour la production de plastiques



(a)

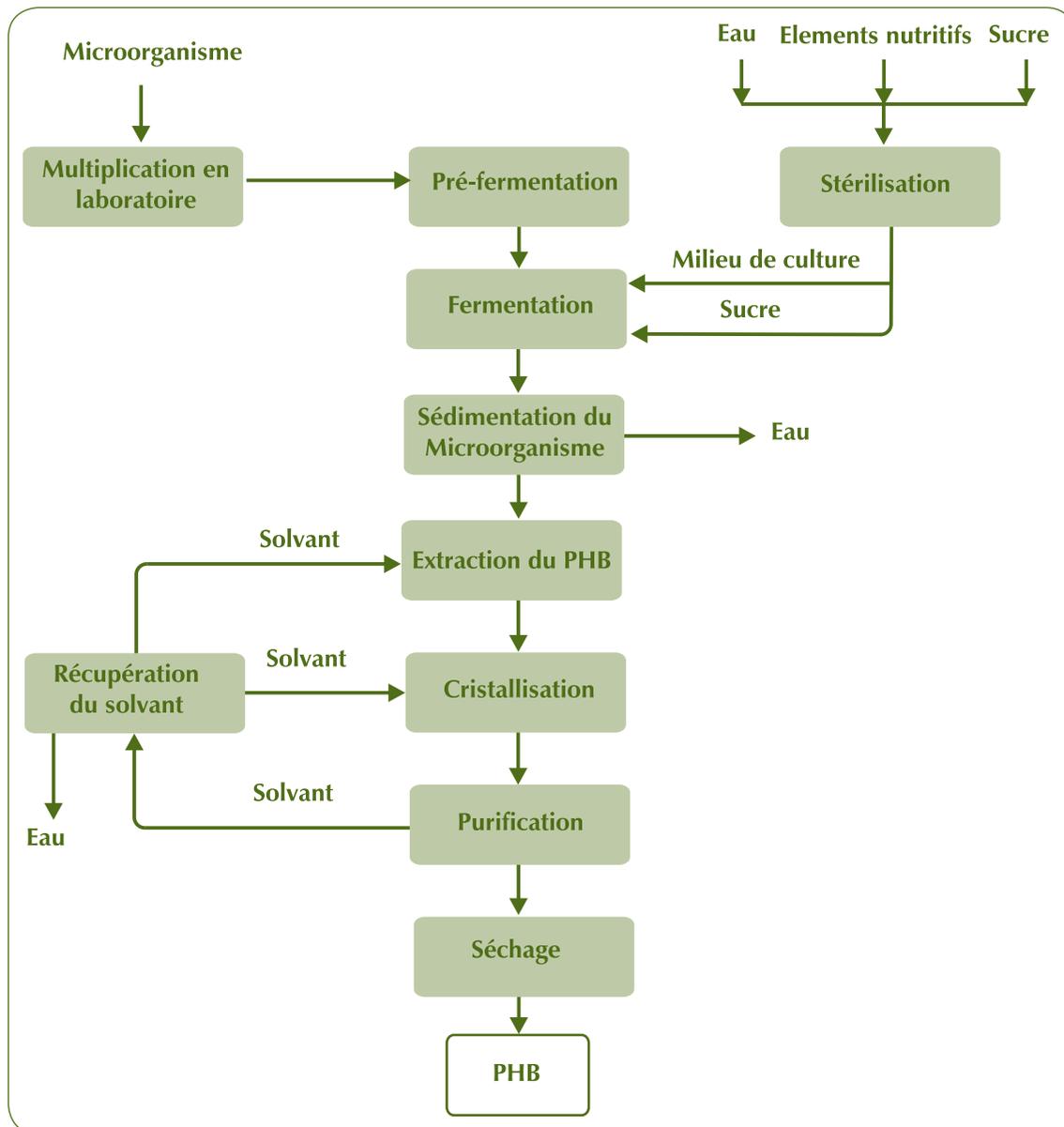


(b)

Source : Akiyama et al. (2003).

Au Brésil, il existe déjà une unité de production de PHB (polyhydroxybutirate), fonctionnant à une échelle-pilote avec une capacité de 60 tonnes annuelles. La société PHB Industrial S.A., de Serrana (SP), est installée à côté de l'Usina da Pedra, unité productrice de sucre et de bioéthanol responsable de la fourniture du sucre utilisé comme matière première et de toute la vapeur et l'énergie électrique demandées par l'usine PHB. La production à échelle industrielle est prévue pour 2008, commençant avec 10 mille tonnes par an, destinées en principe au marché extérieur [Biocycle (2008)]. Dans ce processus, présenté à la Figure 22, la fermentation est faite par des microorganismes cultivés sur un milieu aérobique composé de sucre de canne et d'éléments nutritifs inorganiques [Nonato et al. (2001)]. Dans ce schéma de production, seulement 10% de toute l'énergie consommée dans le cycle de vie du PHB provient de sources d'énergie non renouvelable, car la bagasse garantit toute l'énergie nécessaire au processus [Seabra e Macedo (2006)]. Ceci étant, il est raisonnable d'estimer que les rendements en termes d'utilisation d'énergie non renouvelable et d'émissions de GES seront considérablement meilleurs que ceux des polymères obtenus d'autres sources.

Figure 22 – Diagramme de flux de la production de PHB à base de sucre de canne



Source : Nonato (2007).

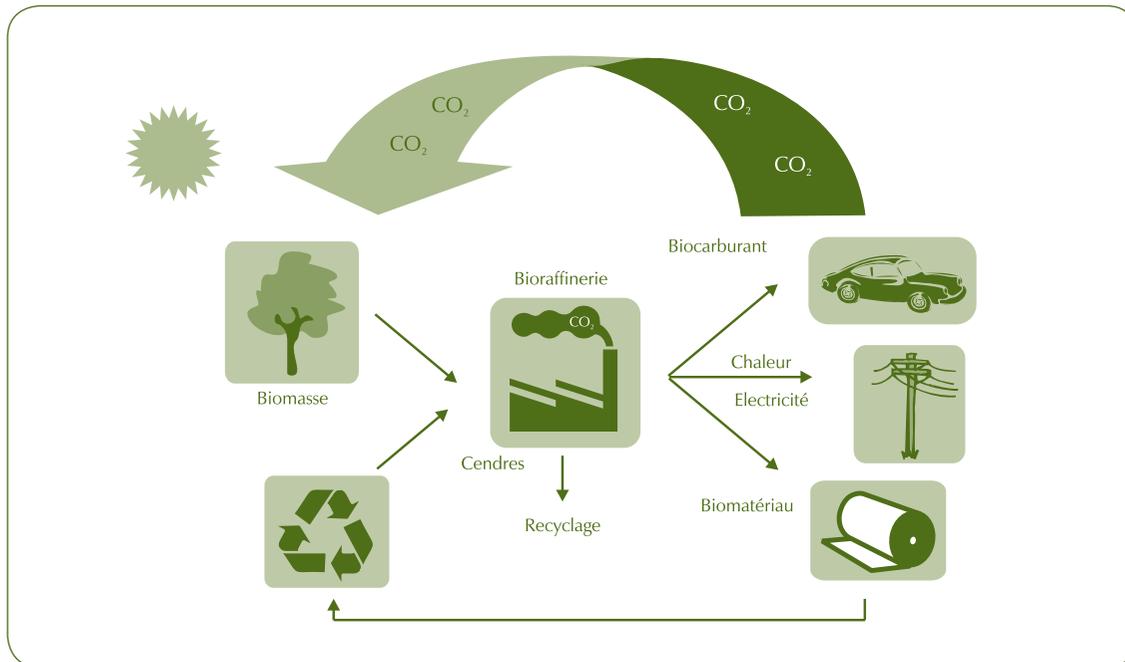


Usine-pilote de PHB Industrial S.A. pour la production de plastique biodégradable à base de sucre de canne.

5.5 Bioraffinerie : produits multiples et utilisation intégrale de la matière première

Une véritable bioraffinerie, par analogie au cas du pétrole, peut être définie comme un complexe industriel intégré, capable de fabriquer différents produits (combustibles, chimiques et puissance) à base de différentes biomasses [Ondrey (2006)], selon un concept qui permettrait d'atteindre une meilleure efficacité, tant du point de vue thermodynamique que du point de vue économique et environnemental. Aujourd'hui, la production de bioéthanol de canne à sucre peut déjà être considérée un exemple de bioraffinerie, avec la production combinée de sucre, de bioéthanol et de plusieurs autres produits chimiques, ainsi que la production d'énergie et de la chaleur à base de biomasse résiduelle [Macedo (2005)].

Figure 23 – Cycle intégré complet agro-biocarburant-biomatériau-bioénergie pour les technologies durables



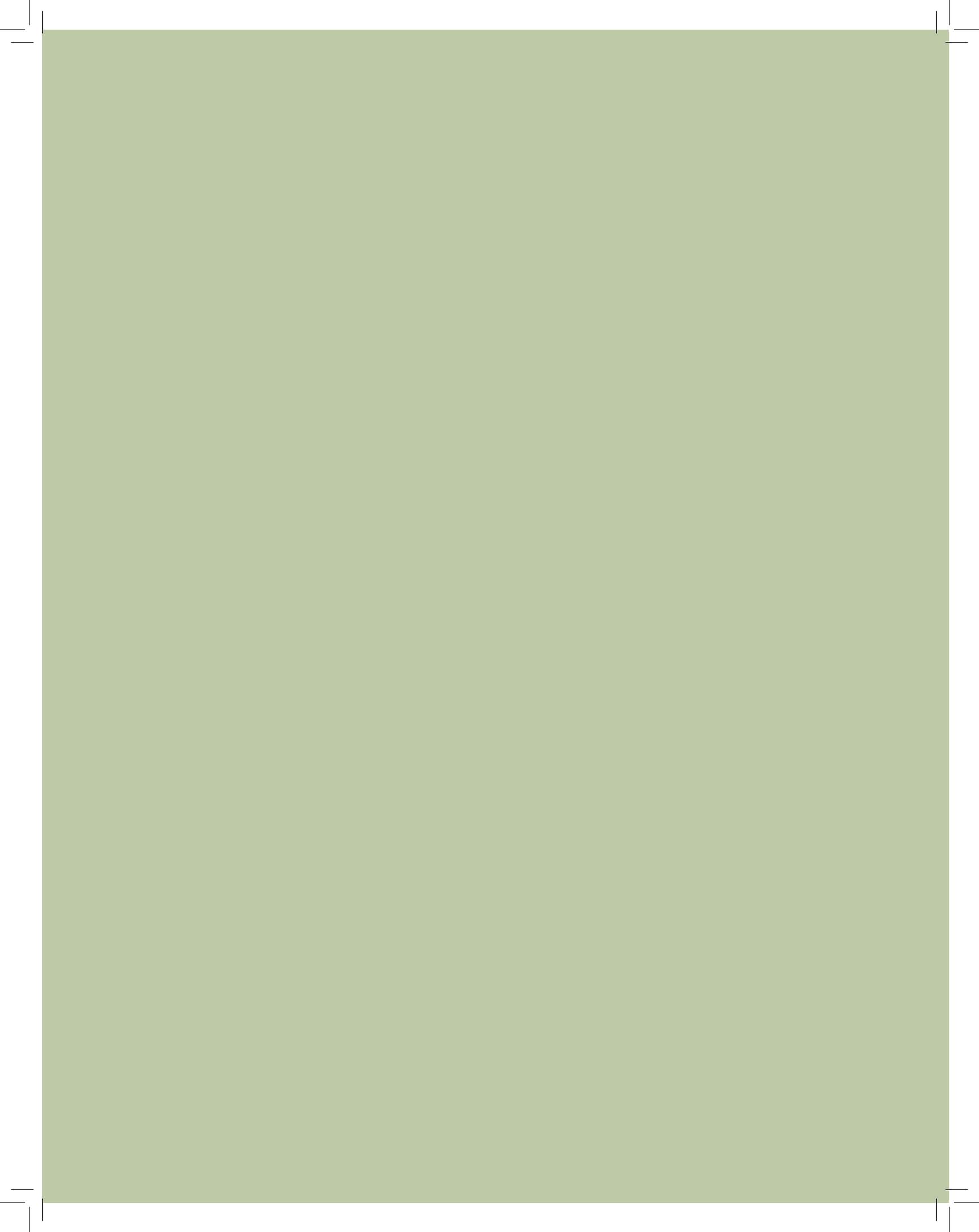
Source : Elaboré sur base de Ragauskas et al. (2006).

Ragauskas et al. (2006) ont publié une ample discussion sur le concept et les possibilités des bioraffineries. Selon eux, elles représentent une option optimisée d'utilisation de la biomasse pour une production durable de bioénergie, de biocarburants et de biomatériaux, tant à court terme qu'à long terme. En raison de cette caractéristique, de grands investissements dans le développement ont été réalisés ces dernières années, par les gouvernements et aussi par les grandes entreprises du secteur privé [Genencor (2003), Oils and Fats International (2005) e Ondrey (2006)]. Il ne faudra donc pas attendre longtemps pour voir exister des usines de taille commerciales compétitives.

Quelques cas de « bioraffineries théoriques », basées sur des technologies considérées comme bientôt « mûres », ont été analysés. Lynd et collaborateurs (2005) ont imaginé la production future, à partir de matériaux lignocellulosiques, de combustibles Fischer-Tropsch et d'hydrogène, ainsi que l'autosuffisance en énergie (puissance moteur). Ils ont aussi évalués des scénarios de coproduction de bioéthanol et d'énergie, de bioéthanol, énergie, et combustibles FT, de bioéthanol- et hydrogène, ou d'autres combinaisons incluant la production de protéine. Selon cette analyse, certains scénarios atteindraient une efficacité énergétique globale de l'ordre de 70% et seraient économiquement compétitifs avec des processus conventionnels, sur la base des prix des combustibles fossiles de ces dernières années.

Un processus similaire de diversification productive et de mise en valeur de sous-produits est en cours dans les industries forestières, processus qui comprend la production de papier et de cellulose, d'énergie et d'une diversité de produits chimiques, contribuant ainsi à augmenter l'efficacité des processus, à améliorer leur rentabilité économique et à réduire les impacts sur l'environnement [Karlsson (2007)]. Cette agro-industrie offre des perspectives de croissance similaires à celles de l'agro-industrie de la canne à sucre, et il y aura certainement des synergies intéressantes possibles entre les deux pour le développement de technologies et de marchés.

Pour cette raison, les technologies-clés sont la gazéification (pour la production du gaz de synthèse) et la conversion de lignocellulose en sucres [Werpy et al. (2005)]. Au long de ce chapitre, nous avons pu percevoir l'énorme potentiel de la technologie de la gazéification, avec les possibilités de production d'énergie et de différents combustibles. Pour illustrer le potentiel de l'hydrolyse, il suffit d'avoir à l'esprit que, lorsque la technologie deviendra commerciale et compétitive, tous les processus biochimiques à base de sucre pour la production de plastiques, d'acides organiques et de solvants, entre autres, ne seront plus restreints à l'industrie du sucre conventionnel, mais pourront dériver d'autres biomasses.





Chapitre 6

Le bioéthanol de canne à sucre au Brésil

L'histoire quasi séculaire du bioéthanol de canne à sucre comme combustible au Brésil permet une mise en perspective intéressante de cette utilisation : construction progressive d'une structure institutionnelle, évolution des paramètres techniques agro-industriels, qui tracent une trajectoire exemplaire de gains de productivité, augmentation régulière des gains environnementaux, comme la réduction de la demande en eau et l'utilisation croissante de processus de recyclage. Dans les prochains paragraphes, ce contexte brésilien sera analysé plus en détail. Sera d'abord présenté le développement historique de l'utilisation du bioéthanol comme combustible, phase durant laquelle sont intervenus divers visionnaires et des techniciens dévoués en même temps qu'était établie la base légale et institutionnelle qui a permis à cette alternative énergétique de devenir progressivement un constituant habituel du modèle énergétique brésilien. Ensuite, sera décrite la situation actuelle de la production de bioéthanol au Brésil, les caractéristiques principales du parc de production et les perspectives d'évolution de ses indicateurs de productivité, basées sur un processus permanent d'innovation technologique. Ce sera le final de ce chapitre qui analysera comment la recherche et le développement de méthodes, d'équipements et de processus ont permis à l'agro-industrie de la canne à sucre de s'affirmer comme source durable d'énergie.



6.1 Evolution du bioéthanol combustible au Brésil

En 1903, les conclusions du 1er Congrès National sur les Applications industrielles de l'Alcool recommandaient déjà l'implantation d'une infrastructure pour la production de bioéthanol pour automobiles au Brésil [Goldemberg et al. (1993)]. Avec la création, en 1920, de la Station Expérimentale de Combustibles et Minerais, futur Institut National de Technologie (INT), ont été initiés, avec de bons résultats, divers tests de véhicules fonctionnant au bioéthanol (dénommé à l'époque alcool-moteur), dans le but déclaré de substituer l'essence dérivée du pétrole qui se révélait peu abondante et de plus en plus onéreuse [Castro e Schwartzman (1981)]. Parmi les pionniers de l'utilisation du bioéthanol comme combustible pour véhicules, se distinguent Heraldo de Souza Mattos (en 1923 il participa à des courses automobiles en utilisant du bioéthanol hydraté pur comme combustible), Fernando Sabino de Oliveira (auteur du livre l'Alcool-Moteur et les Moteurs à Explosion, publié en 1937) et Lauro de Barros Siciliano (qui rédigea des dizaines d'études techniques sur l'utilisation du bioéthanol dans les moteurs), qui réalisèrent des essais sur bancs et sur route et cherchèrent à motiver le gouvernement et les chefs d'entreprises (Vargas, 1990).



Véhicule Ford adapté par l'INT en 1925 pour démontrer l'utilisation du bioéthanol pur comme combustible.

Sur la base de ces expériences, dans le but de réduire les impacts de la dépendance totale envers les combustibles dérivés du pétrole et d'utiliser les excédents de production de l'industrie sucrière, le gouvernement brésilien détermina, par le Décret 19.717, signé en 1931 par le

président Getúlio Vargas, le mélange obligatoire de minimum 5% de bioéthanol anhydre à l'essence. Au début cette obligation ne concernait que l'essence importée, mais elle a été ensuite étendue à l'essence produite localement. Postérieurement, l'Institut du Sucre et de l'Alcool (IAA) s'est vu confier la responsabilité d'établir les prix, les quotas de production par usine et le pourcentage de mélange [Brasil (1931)]. C'est ainsi que l'utilisation du bioéthanol comme combustible pour automobiles, possibilité connue de l'industrie automobile depuis plus d'un siècle, est pratiquée régulièrement au Brésil depuis 1931, pratiquement dès l'époque de l'introduction des automobiles comme moyen de transport dans le pays.

La teneur de bioéthanol dans l'essence brésilienne varia au long des décennies successives, se situant en moyenne à 7,5% jusqu'en 1975. A cette date, les effets du premier choc du pétrole imposèrent la nécessité d'augmenter l'utilisation de ce biocarburant dans les moteurs. En raison de la montée des prix internationaux du pétrole, les dépenses relatives à son importation passèrent de US\$ 600 millions en 1973 à US\$ 2,5 milliards en 1974, provoquant un déficit dans la balance commerciale de US\$ 4,7 milliards. Au long des années suivantes, ces chiffres commencèrent à peser fortement sur la dette extérieure brésilienne et sur l'inflation.

Dans le contexte actuel du marché énergétique, dans lequel divers pays se tournent vers le bioéthanol comme option énergétique, il est intéressant de revoir les principaux jalons historiques qui ont permis de consolider la production du bioéthanol combustible au Brésil.

Dès la première moitié de la décennie de 1970, c'est dans le but d'élaborer une réponse à la nouvelle situation énergétique représentée par le choc du pétrole que des chefs d'entreprise visionnaires, comme Lamartine Navarro Jr. et Cícero Junqueira Franco, développèrent une proposition de réduction de la dépendance envers le pétrole importé. Ils combinèrent la préférence de l'Institut du Sucre et de l'Alcool pour une production exclusive de bioéthanol, dans des distilleries autonomes, avec l'intérêt de Copersucar, principale coopérative de producteurs de sucre, qui souhaitait mettre à profit la capacité non utilisée des distilleries annexées aux usines de sucre. Un document contenant les recommandations issues des discussions entre le secteur privé et le gouvernement autour de cette proposition fut remis au Conseil National du Pétrole en mars 1974 [Bertelli (2007)].

Un autre fait important ayant contribué à la décision du gouvernement en faveur de l'augmentation de l'utilisation du bioéthanol fut une visite du président Ernesto Geisel au Centre Technologique de l'Aéronautique, en juin 1975. Au cours de cette visite lui furent présentés les travaux développés par le professeur Urbano Ernesto Stumpf sur l'emploi du bioéthanol dans les moteurs, incluant des tests d'essence avec des teneurs plus élevées en bioéthanol anhydre et des essais de moteurs, adaptés, fonctionnant exclusivement au bioéthanol hydraté. A cette occasion est apparu clairement que le Brésil disposait d'une solution adaptée à sa situation : du côté de l'offre, on pouvait augmenter la production de bioéthanol en utilisant la capacité non utilisée des usines de sucre, et du côté de la consommation, on pouvait élever la teneur de bioéthanol dans l'essence et, éventuellement, utiliser le bioéthanol pur.

Sur la base de ces prémisses, après de nouvelles études et de nouveaux débats, le gouvernement fédéral institua le Programme National de l'Alcool (Pro-alcool), au moyen du Décret 76.593, du 14/11/1975, signé par le président Geisel. Ce décret établit des lignes spécifiques de financement, formalisa la création de la Commission Nationale de l'Alcool (CNA), responsable de la gestion du programme, et détermina une parité de prix entre le bioéthanol et le sucre cristal *standard*, stimulant ainsi la production de ce biocarburant, qui était jusqu'alors un sous-produit de moindre valeur. Dans ce contexte, les objectifs de production furent établis à 3 milliards de litres de bioéthanol pour 1980, et 10,7 milliards de litres pour 1985. Diverses mesures incitatives furent mises en oeuvre pour stimuler l'expansion et l'utilisation de bioéthanol combustible, d'abord en augmentant l'addition de bioéthanol anhydre à l'essence. Dans les premières années de la mise en oeuvre du Pro-alcool, un rôle décisif fut joué par le ministre de l'Industrie et du Commerce, Severo Gomes, qui compta sur l'appui du secrétaire de Technologie Industrielle, José Walter Bautista Vidal, pour la mise en forme initiale du programme, et postérieurement, dans sa phase de plus forte expansion à partir de 1979, sur l'appui du ministre João Camilo Pena, qui se montrèrent effectivement engagés en faveur du bioéthanol combustible et créèrent les bases de sa consolidation. Message de cette génération de pionniers, le livre *Energie de la biomasse – Levier d'une nouvelle politique industrielle* montre la nécessité de transcender les systèmes énergétiques conventionnels pour atteindre la « civilisation de la photosynthèse » [Guimarães et al. (1986)].

Avec une norme légale clairement favorable au bioéthanol, sa production augmenta de manière significative. Entre 1975 et 1979, la production de bioéthanol (anhydre et hydraté) passa de 580 mille m³ à 3.676 mille m³, dépassant de 15% l'objectif fixé pour cette année-là. La recrudescence de la crise du pétrole en 1979, avec une nouvelle montée des prix, a conduit à renforcer le plan Pro-alcool, en stimulant l'utilisation de bioéthanol hydraté dans des moteurs adaptés ou produits spécifiquement pour l'emploi de ce biocarburant. À cette époque, la dépendance du Brésil envers le pétrole importé était de l'ordre de 85%, ce qui représentait 32% du total des importations brésiliennes, avec des impacts encore plus graves sur l'économie nationale. C'est ce qui a justifié l'objectif ambitieux de produire 10,7 milliards de litres de bioéthanol en 1985. Avec cet objectif, au moyen du Décret 83.700, de 1979, le gouvernement fédéral renforça l'appui à la production d'alcool, avec la création du Conseil National de l'Alcool (CNAL), auquel incombait la conduite générale du Pro-alcool, et de la Commission Exécutive Nationale de l'Alcool (Cenal), responsable de la mise en oeuvre du programme [CGEE (2007a)]. Dans de telles conditions, la production de bioéthanol atteignit 11,7 milliards de litres en 1985, dépassant de 8% l'objectif fixé au départ.

En résumé, l'ensemble des mesures incitatives adoptées par le Pro-alcool à cette époque, qui se montrèrent effectivement capable de stimuler les agents économiques, incluait : a) la définition de niveaux minima plus élevés dans la teneur de bioéthanol anhydre dans l'essence, niveaux qui furent élevés progressivement jusqu'à atteindre 25% ; b) la garantie d'un prix au consommateur pour le bioéthanol hydraté, plus bas que le prix de l'essence (à cette époque, les prix des combustibles au long de toute la chaîne productive, étaient déterminés par le gouvernement fédéral) ; c) la garantie d'une rémunération compétitive pour le producteur

de bioéthanol, même face à des prix internationaux plus attractifs pour le sucre que pour le bioéthanol (subvention de compétitivité), d) l'ouverture de lignes de crédit avec prêts à des conditions favorables pour permettre aux usines d'augmenter leur capacité de production ; e) une réduction d'impôts (sur la vente de voitures neuves et sur la vignette annuelle du véhicule) pour les véhicules au bioéthanol hydraté ; f) établissement du caractère obligatoire de la vente de bioéthanol hydraté dans les stations-service ; et g) le maintien de stocks stratégiques pour assurer l'approvisionnement entre les récoltes.

En 1985 se produisit un retournement de situation, avec le début de la réduction des prix du pétrole et la remontée des prix du sucre. Ceci démotiva la production de bioéthanol et entraîna une situation difficile qui mit fin à la phase d'expansion du Pro-alcool. En 1986, le gouvernement fédéral revisa ses politiques incitatives, ce qui réduisit la rentabilité moyenne de l'agro-industrie de la canne à sucre, et stimula encore d'avantage l'utilisation de la matière première disponible pour la fabrication de sucre pour l'exportation. Un résultat éloquent du manque d'attention gouvernemental en faveur du bioéthanol et de l'absence de politiques spécifiques pour ce biocarburant, est que les consommateurs de bioéthanol commencèrent à affronter des discontinuités dans l'offre du produit à partir de 1989. Les mécanismes de formation de stocks de sécurité ne fonctionnèrent pas et des mesures d'urgence furent nécessaires, comme la réduction de la teneur de bioéthanol dans l'essence, l'importation de bioéthanol et l'utilisation de mélanges d'essence et de méthanol comme substitut au bioéthanol.

Une conséquence durable de cette crise d'approvisionnement – d'un produit national dont la publicité disait que « vous pouvez l'utiliser, il ne manquera pas » – fut la perte de confiance du consommateur brésilien, ce qui mena inévitablement à la chute des ventes de voitures fonctionnant au bioéthanol pur. Ainsi, après avoir représenté 85% du total des véhicules neufs vendus en 1985, les ventes de véhicules fonctionnant au bioéthanol terminèrent la décennie en ne représentant plus que 11,4%, en 1990 [Scandiffio (2005)]. Ce n'est qu'à partir du milieu de l'année 2003, avec le lancement des véhicules « flexibles » (dits véhicules *flex-fuel*) que la consommation de bioéthanol hydraté recommença à croître de manière expressive.

Il est intéressant d'observer que, même à cette époque d'apparente indéfinition sur l'avenir du bioéthanol, des études indépendantes suggéraient la nécessité de maintenir le programme en opération. Il était proposé d'ajuster son taux de croissance au nouveau contexte, mais tout en assurant la continuité du programme, non seulement pour les bénéfices environnementaux et sociaux associés, mais aussi pour les gains de productivité en cours, qui rendaient le bioéthanol compétitif face à un pétrole à US\$ 30 le baril [Serôa da Motta e Ferreira (1988)].

Jusqu'au début des années 1990, les caractéristiques structurelles de base de l'agro-industrie du sucre et de l'alcool au Brésil, résultant de décennies de contrôle rigide par l'Etat, étaient d'avoir une production agricole et industrielle sous le contrôle des usines, une productivité hétérogène (spécialement dans la production de la canne), une mise à profit réduite des sous-produits et une compétitivité basée en grande partie sur de bas salaires et sur une production extensive. Les différences techniques étaient significatives entre les unités de production des

régions Nord / Nord-Est et Centre-Sud et, même dans une région donnée, il existait des différences accentuées de productivité et d'échelle de production [CGEE (2007a)].

Suite aux changements administratifs implantés au début des années 1990, qui modifièrent rôle de l'Etat dans l'économie nationale, le gouvernement brésilien déclencha le processus de libéralisation et de réaménagement institutionnel du secteur du sucre et de l'alcool. Il ferma l'Institut du Sucre et de l'Alcool et passa la gestion des thèmes relatifs au bioéthanol sous la responsabilité du Conseil Interministériel de l'Alcool (CIMA), présidé par le Ministère de l'Industrie et du Commerce jusqu'en 1999, lorsque sa présidence passa au Ministère de l'Agriculture. Avec le retrait progressif des subventions et la fin de la fixation réglementaire des prix du bioéthanol à partir de 1991, commença le processus de libération totale des prix pour le secteur du sucre et de l'alcool, processus conclu seulement en 1999. C'est ainsi qu'entra en opération un nouveau modèle de rapports entre les producteurs de canne à sucre, les producteurs de bioéthanol et les entreprises de combustible, dans lequel prévalent les règles du marché adoptées actuellement dans le pays. Du cadre original de mesures légales et fiscales qui avaient permis de consolider le bioéthanol combustible au Brésil, ne reste en vigueur que le niveau de fiscalité différentiel du bioéthanol hydraté et des véhicules au bioéthanol, mesures qui visent à maintenir dans des conditions approximatives de parité pour le consommateur l'utilisation de bioéthanol hydraté ou d'essence.

Dans ce contexte, les prix du bioéthanol anhydre ou hydraté se négocient librement entre les producteurs et les distributeurs. Dans le domaine de l'agro-industrie, le prix de la canne est libéré également, mais il est majoritairement déterminé selon un modèle contractuel établi sur des bases volontaires et coordonné conjointement par les planteurs de canne et les producteurs de bioéthanol et de sucre. Dans ce modèle, le sucre contenu dans la canne qui est traitée, ainsi que le sucre et le bioéthanol produits par les usines, sont convertis tous sur une base commune de comparaison en « sucres totaux récupérables », ou ATR. Selon ce concept, la canne est rémunérée en fonction de son apport effectif à la production, apport mesuré en ATR présent dans la matière première livrée à l'agro-industrie, et le prix est déterminé par le résultat économique des deux produits obtenus, le sucre et le bioéthanol, en considérant les ventes sur les marchés interne et d'exportation. Dans l'Etat de São Paulo et dans les régions voisines, ce modèle est géré par le Conseil des Producteurs de Canne, de Sucre et d'Alcool de l'Etat de São Paulo (Consecana), constitué en 1997 et composé de représentants de tous les secteurs privés concernés [Scandiffio (2005)].

Un tel processus de réaménagement du rôle et de la forme d'intervention des agents économiques ne s'est pas produit de manière suave et consensuelle, mais avec de grandes divergences entre, d'une part, les chefs d'entreprises conservateurs, qui voulaient maintenir l'appareil interventionniste et ses garanties de marché et d'obtention de profits, et d'autre part, des progressistes, qui désiraient un marché plus libéré, avec des possibilités d'investissement et l'obtention de gains au moyen de différentiels de productivité. C'est ce second groupe qui, au long du temps et par la force des progrès atteints, a prévalu. Dans ce contexte, l'existence d'une norme institutionnelle encadrant et consolidant les transformations mises en oeuvre fut essentielle.

Dans cette restructuration institutionnelle du domaine de l'agro-industrie, deux institutions importantes furent créées par la Loi 9.478, de 1997 : le Conseil National de Politique Énergétique (CNPE), dont les attributions incluent l'établissement de directives pour les programmes spécifiques d'utilisation des biocarburants, et l'Agence Nationale du Pétrole (ANP), qui, selon la Loi 11.097, de 2005, fut renommée Agence Nationale du Pétrole, du Gaz Naturel et des Biocarburants, élargissant son champ d'action. Parmi les attributions de l'ANP, citons la promotion de la réglementation, la contractualisation et le contrôle des activités économiques liées aux biocarburants, avec pour finalité d'élargir la politique nationale de biocarburants en mettant l'accent sur la garantie d'approvisionnement dans tout le territoire national et sur la protection des intérêts du consommateur en ce qui concerne le prix, la qualité et l'offre de produits. Plus spécifiquement, son attribution concerne : le contrôle et l'application des sanctions administratives et financières prévues par la loi ou par contrat ; la surveillance du respect des bonnes pratiques de conservation et d'utilisation rationnelle des biocarburants et de préservation de l'environnement ; l'organisation et la conservation de la collection d'informations et de données relatives aux activités réglementées de l'industrie des biocarburants ; et la spécification de la qualité des biocarburants. Cette dernière attribution est très importante, présupposant un support technique adéquat ainsi que l'établissement d'espaces de dialogue entre producteurs de bioéthanol, fabricants de moteurs et agences environnementales. Comme déjà vu au Chapitre 2, la spécification du bioéthanol anhydre et hydraté à des fins combustibles est définie par une résolution de l'ANP.

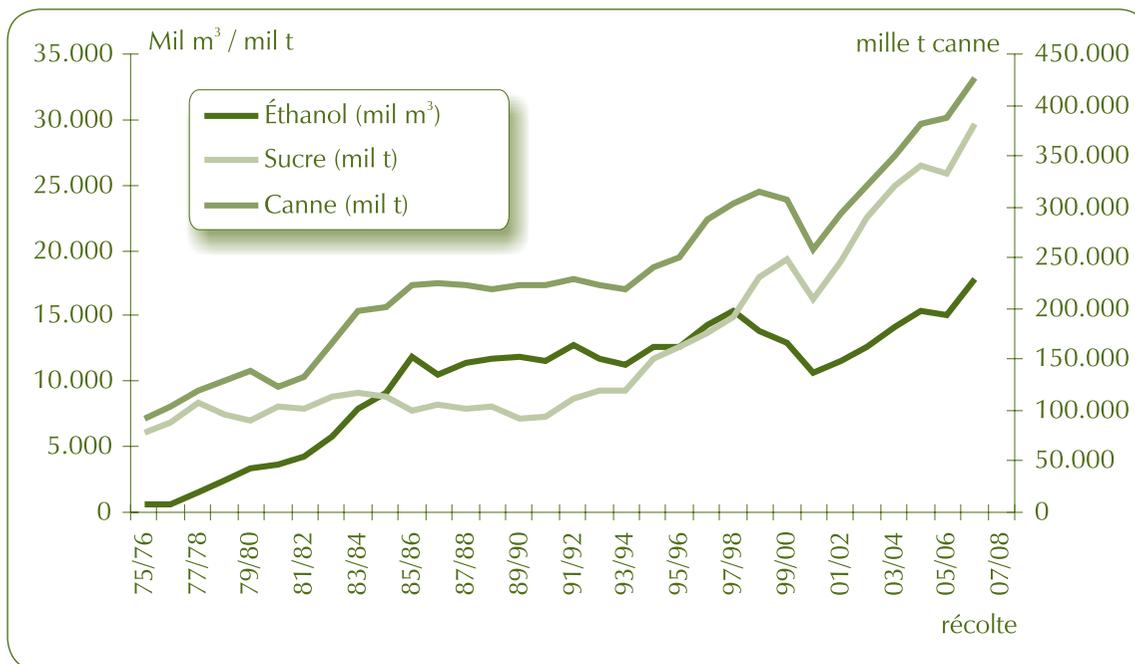
Ce processus de révision institutionnelle est complété par la constitution, par le gouvernement fédéral, du Conseil Interministériel du Sucre et de l'Alcool (CIMA), créé par le Décret 3.546, de 2000. Cette entité a pour objectif de délibérer sur les politiques en rapport avec les activités du secteur du sucre et de l'alcool, considérant entre autres, les aspects suivants : a) une participation adéquate des produits de la canne à sucre dans la matrice énergétique nationale ; b) les mécanismes économiques nécessaires à l'autosuffisance sectorielle ; et c) le développement scientifique et technologique du secteur. Ce Conseil est composé du ministre de l'Agriculture et de l'Approvisionnement, qui le préside, et des ministres des Finances, du Développement, de l'Industrie et du Commerce Extérieur, et des Mines et Énergie. Les principales attributions de ce conseil sont la définition et la révision périodique de la teneur de bioéthanol dans l'essence, dans une fourchette entre 20% et 25%. Cette teneur s'est située à 25% durant la majeure partie des dernières années, bien qu'elle puisse être réduite (et elle l'a été effectivement) en fonction des disponibilités et des conditions du marché.

En 2003, avec l'arrivée des véhicules *flex-fuel* et leur grande acceptation par les consommateurs, dans la mesure où les propriétaires de ces véhicules peuvent choisir l'utilisation de l'essence (avec 25% de bioéthanol anhydre) et/ou du bioéthanol hydraté, en fonction du prix, de l'autonomie, du rendement ou même de la disponibilité, la consommation de bioéthanol hydraté sur le marché interne a repris. De nouvelles perspectives se sont ouvertes pour l'expansion de l'agro-industrie de la canne au Brésil, venant s'ajouter aux possibilités d'expansion de la demande internationale de bioéthanol anhydre pour utilisation dans des mélanges avec l'essence. Depuis lors, l'agro-industrie de la canne à sucre

brésilienne est en expansion à des taux élevés, se renforçant économiquement et présentant des indicateurs positifs de durabilité environnementale, comme cela sera indiqué plus loin dans ce chapitre.

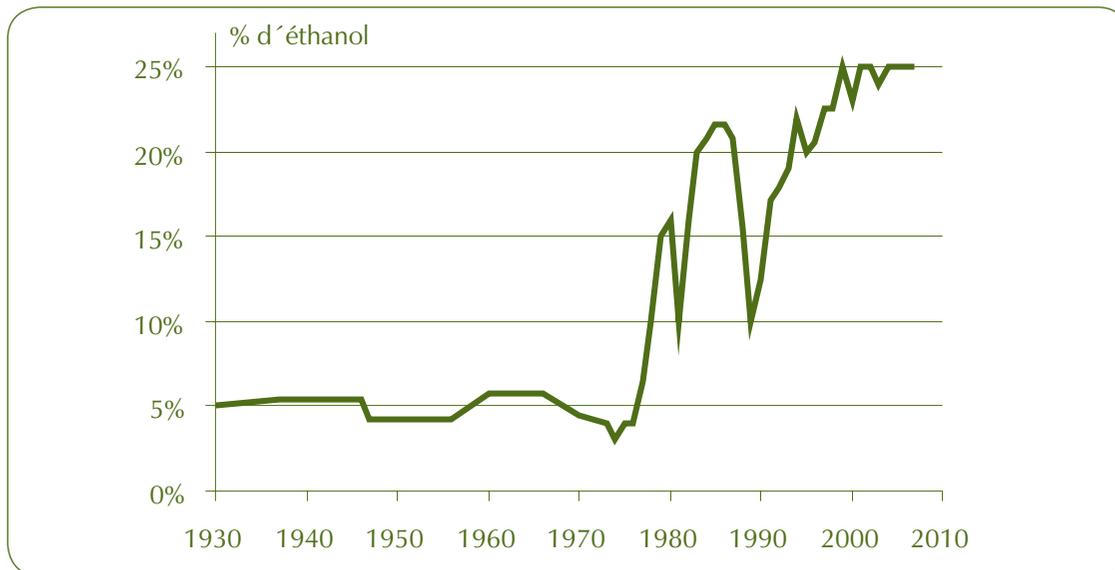
Les graphiques 16, 17 et 18 résument bien le processus d'expansion de la production du bioéthanol durant les dernières décennies, processus décrit dans les paragraphes précédents. Le graphique 16 montre comment la production de canne et de bioéthanol (anhydre et hydraté), suivie de l'augmentation de la production de sucre, a bien répondu à l'expansion de la demande de ce biocarburant [Unica (2008)], expansion illustrée, à son tour, (Graphique 17) par l'évolution de la teneur de bioéthanol anhydre dans l'essence, présentée depuis le début de l'utilisation de bioéthanol dans le pays [EPE (2007) et MAPA (2008)] et (Graphique 18) par la croissance de la production de véhicules fonctionnant au bioéthanol hydraté. Dans la première phase du Pro-alcool, la flotte fonctionnant au bioéthanol atteint 2,5 millions de véhicules dès 1985, ce qui représentait plus de 90% des ventes réalisées. Cette proportion n'a été reconquise qu'à partir de 2003 avec le lancement des véhicules flexibles [Anfavea (2008)]. Actuellement, 5,5 millions de véhicules brésiliens (avec moteurs au bioéthanol hydraté et moteurs flexibles), soit l'équivalent de 20% environ de la flotte de 25,6 millions de véhicules, peuvent utiliser régulièrement ce biocarburant.

Graphique 16 – Évolution de la production de canne à sucre, d'éthanol et de sucre au Brésil



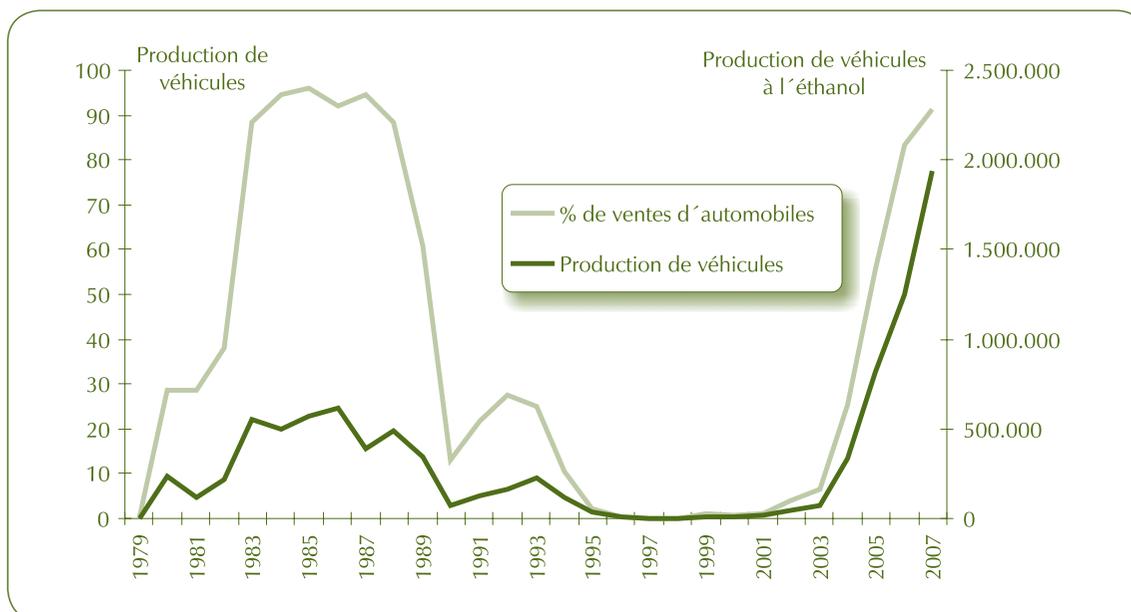
Source : Unica (2008).

Graphique 17 – Teneur moyenne d'éthanol anhydre dans l'essence brésilienne



Source : MME (2008).

Graphique 18 – Evolution de la production de véhicules à l'éthanol anhydre et de leur participation dans les ventes de véhicules neufs



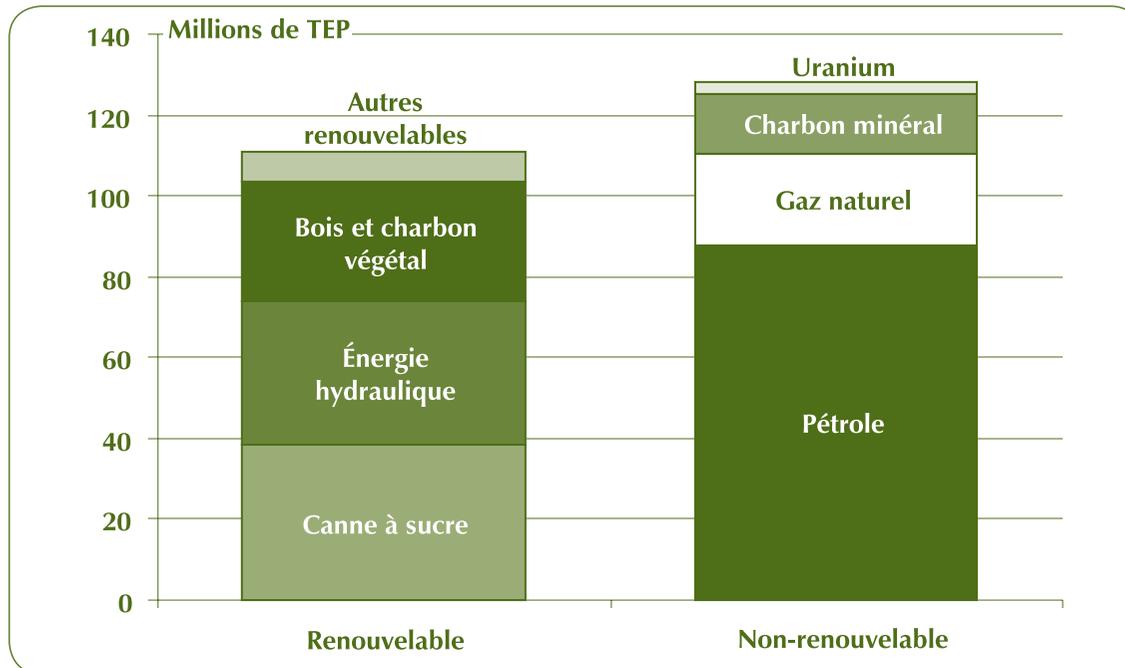
Source : Anfavea (2008).

Dans les graphiques 16, 17 et 18, il est possible d'observer clairement comment, malgré la chute des ventes de véhicules fonctionnant au bioéthanol hydraté durant les années 1990, la

demande de ce biocarburant s'est maintenue plus ou moins constante grâce à l'utilisation du mélange avec l'essence, maintenant ainsi en opération les unités de production à des niveaux plus ou moins stables jusqu'au début de cette décennie lorsque commença un nouveau cycle de croissance. Ainsi, depuis les années 1970, le bioéthanol est utilisé régulièrement en volumes importants au Brésil et n'a pas été substantiellement affecté par la chute des ventes des véhicules fonctionnant au bioéthanol hydraté, excepté en ce qui concerne les dernières années de la décennie passée, quand les récoltes de canne ont subi des baisses liées à des problèmes climatiques. À court terme, les perspectives sont d'une croissance soutenue de la demande interne de bioéthanol hydraté, avec des prévisions que la flotte de véhicules aptes pour ce carburant atteigne les 9 millions d'unités en 2010, ce qui correspondra à 32% de la flotte de véhicules prévue cette année là [Pires (2007)].

Du point de vue économique, la mise en oeuvre du Pro-alcool, entre 1975 et 1989, a coûté approximativement US\$ 7,1 milliards, dont US\$ 4 milliards financés par le gouvernement brésilien et le restant provenant de sources privées [Dias Leite (2007)]. Considérant la consommation de bioéthanol combustible pour la période de 1976 à 2005, valorisée par le prix de l'essence sur le marché mondial, l'économie de devises fut de l'ordre de US\$ 195,5 milliards, dont US\$ 69,1 milliards en importations évitées et US\$ 126,4 milliards en intérêts de la dette extérieure évités [BNDES (2006)].

Graphique 19 – Sources primaires d'énergie utilisées au Brésil en 2007



Source : MME (2008).

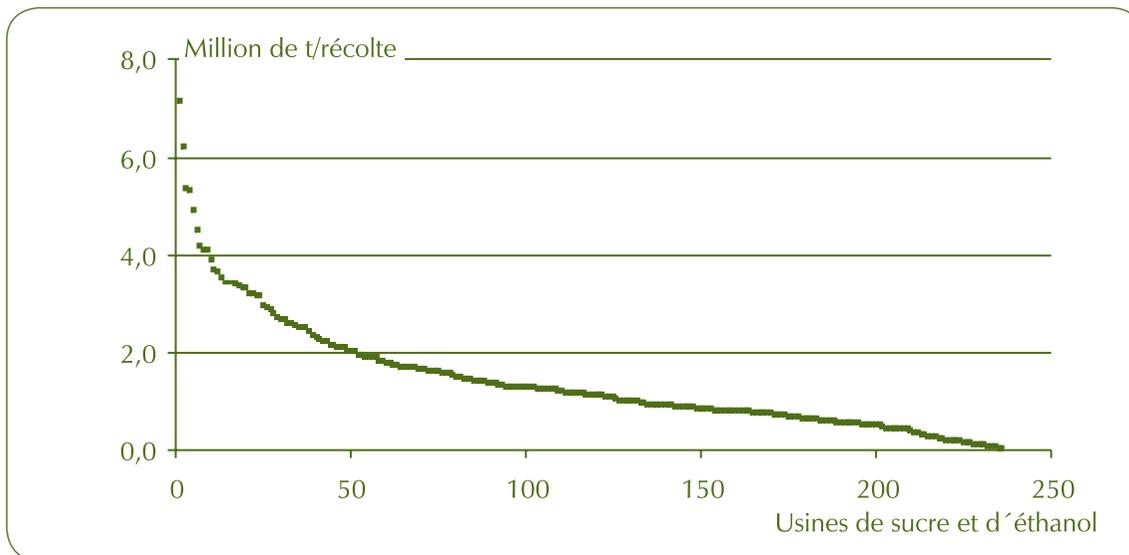
Un résultat (Graphique 19) résumant l'importance du secteur bioénergétique de la canne à sucre au Brésil, est que, la participation de ce segment dans la matrice énergétique nationale a atteint 16% en 2007, soit un peu plus que celle de l'énergie hydroélectrique (responsable de 90% de l'électricité produite dans le pays), contribuant à une part notable de 46,4% d'énergies renouvelables dans l'approvisionnement national en énergie primaire.

6.2 L'agro-industrie de la canne à sucre au Brésil

La canne à sucre est cultivée au Brésil depuis 1532, apportée par Martim Afonso, le premier colonisateur portugais, dans le but d'implanter des moulins à sucre comme ceux existant à l'époque aux Açores. Cette espèce s'est bien adaptée au sol brésilien et, durant toute la période coloniale, elle fut cultivée, avec de bons résultats, sur de grandes superficies de la côte brésilienne. Des dizaines de moulins furent construits, principalement dans la région du « Recôncavo Baiano » et au Pernambuco, et l'économie Brésilienne a alors connu un développement appelé « cycle de la canne à sucre », durant presque deux siècles. Avec l'expulsion des hollandais du Nord-Est, et l'expansion de l'agro-industrie du sucre dans la région des Antilles, vers le milieu du XVII^{ème} siècle, l'importance de la production brésilienne connut une réduction relative, mais elle est toujours resté une activité importante dans l'économie nationale. Elle a été relancée à partir de la création de l'Institut du Sucre et de l'Alcool, en 1933, époque à laquelle l'utilisation du bioéthanol pour automobiles était déjà une réalité naissante. Egalement à partir de cette époque, l'agro-industrie de la canne à sucre commença à s'étendre dans la Région Sud-est, en liaison initialement avec la décadence de la culture du café et postérieurement avec la croissance du marché interne [Szmrecsányi (1979)].

Actuellement, la culture de la canne s'étend dans pratiquement tous les états brésiliens et occupe près de 9% de la superficie agricole du pays ; elle est la troisième culture en importance pour la superficie occupée, après le soja et le maïs. En 2006, la surface de récolte était de l'ordre de 5,4 millions d'hectares, pour une surface plantée de plus de 6,3 millions d'hectares et une production totale de 425 millions de tonnes [Carvalho (2007)]. La principale région productrice est celle du Centre-Sud-Sud-Est, avec plus de 85% de la production, le plus grand producteur national étant l'Etat de São Paulo, avec environ 60% de la production. Le système de production englobe plus de 330 usines, d'une capacité allant de 600 mille à 7 millions de tonnes de canne traitée par an ; une usine de taille moyenne traite annuellement près de 1,4 million de tonnes. La distribution de la capacité annuelle de broyage est présentée à la Figure 55 (chiffres pour la récolte 2006/2007). Les dix principales usines produisent 15% du total de matière première traitée, tandis que les 182 unités plus petites traitent la moitié de la canne. Ces chiffres montrent la basse concentration économique de cette agro-industrie, caractéristique des systèmes bioénergétiques.

Graphique 20 – Distribution de la capacité annuelle de traitement des usines de sucre et d'éthanol au Brésil

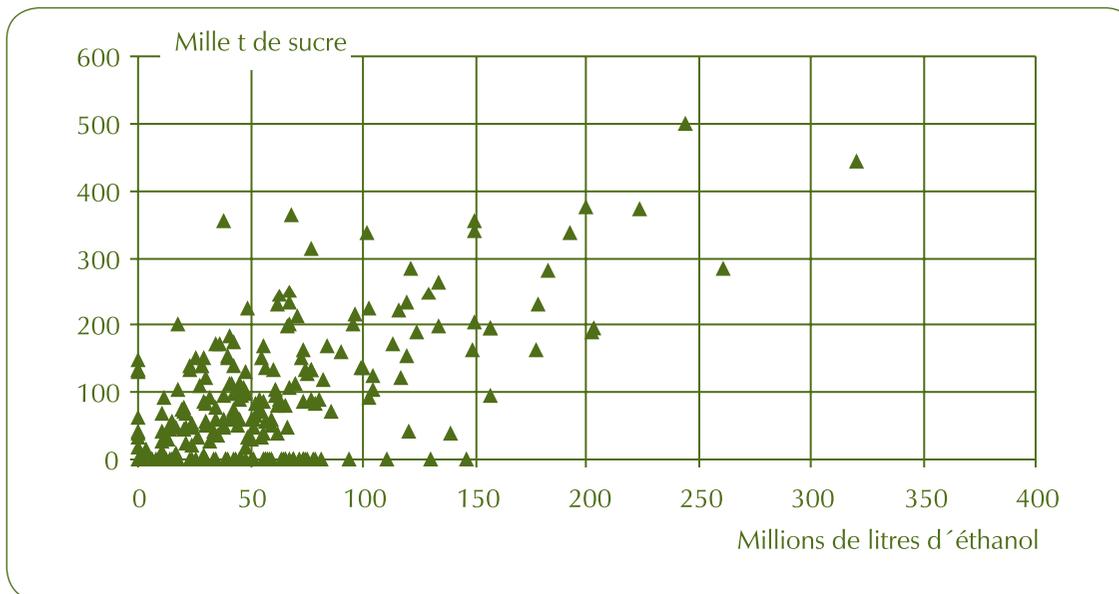


Source : Élaboré sur base de Idea (2007).

Les usines brésiliennes travaillent, en moyenne, avec 80% de canne provenant de terres leur appartenant ou en location, ou appartenant à des actionnaires et de compagnies agricoles en lien avec les usines. Les 20% restants sont fournis par près de 60 mille producteurs indépendants, la majorité utilisant moins de deux « modules » agricoles. Le « module agricole » est défini au Brésil comme la superficie minimum pour assurer la viabilité économique d'une exploitation familiale, valeur qui varie selon la région. Une grande partie des producteurs de canne peut donc être caractérisée comme étant de petits producteurs agricoles, qui produisent de la canne et d'autres produits de l'agriculture et de l'élevage, à des fins économiques et de consommation propre, et qui bénéficient généralement du support technologique des usines (CGEE/NAE, 2005).

Du point de vue du profil de production, les usines brésiliennes peuvent être classées en trois types d'installations : les usines de sucre, qui produisent exclusivement du sucre ; les usines de sucre avec distilleries annexes, qui produisent du sucre et du bioéthanol ; et les installations qui produisent exclusivement du bioéthanol, ou distilleries autonomes. La grande majorité des installations est formée par des usines de sucre avec distilleries annexes (près de 60% du total), suivies par un nombre considérable de distilleries autonomes (près de 35%) et par quelques unités de traitement exclusif du sucre, conformément aux indications du graphique 21. En moyenne nationale, environ 55% des sucres disponibles dans la canne traitée furent destinés à la production de bioéthanol lors de la récolte 2006/2007 [Unica (2008)].

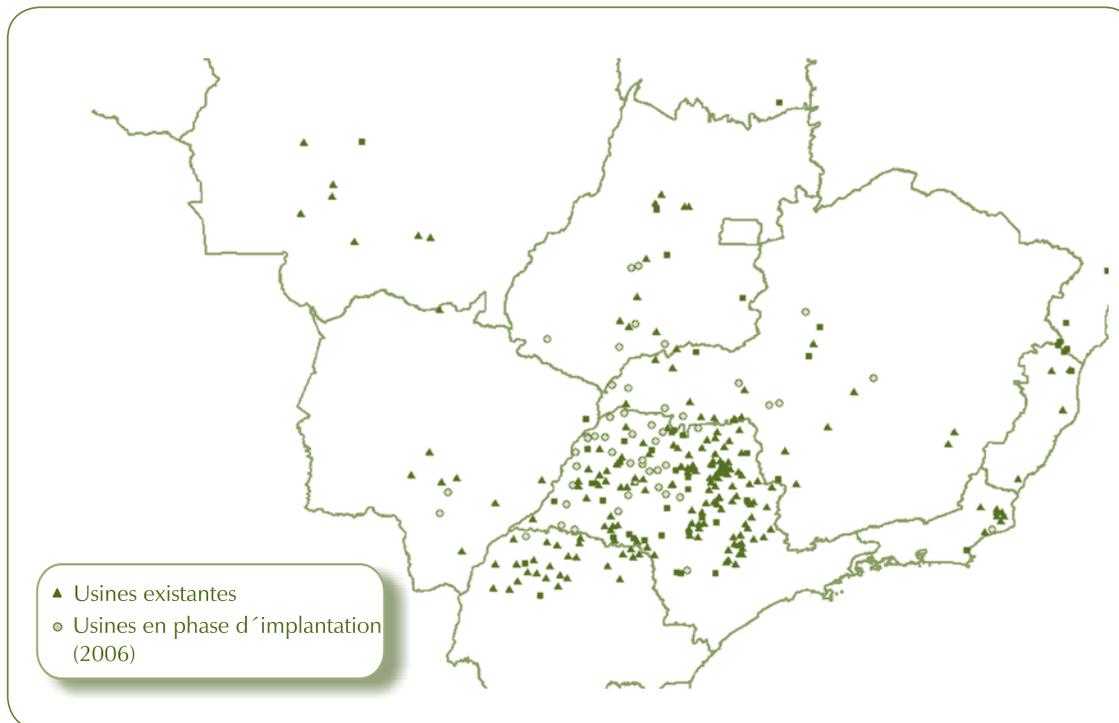
Graphique 21 – Profils de production des usines de sucre et d'éthanol au Brésil dans la récolte 2006/2007



Source : Élaboré sur base de Idea (2007)].

Géographiquement, les usines de sucre et de bioéthanol se situent près des régions productrices de canne, la majeure partie d'entre elles étant localisée dans l'État de São Paulo, comme le montre le Graphique 19. Cette colocalisation, outre les conditions excellentes de sol et de climat, permet de bénéficier d'une conjonction de facteurs : l'existence d'une infrastructure de transports adéquate, la proximité des marchés consommateurs et une base active de développement scientifique et technologique, base fondamentale pour l'expansion et les augmentations de productivité observées dans ce secteur. Cependant, ces dernières années, en raison de la saturation relative des superficies disponibles dans cet état et de l'élévation des coûts de la terre, les nouvelles unités de production se sont installées dans des régions occupées auparavant par des pâturages et, sur une moindre échelle par des cultures annuelles, dans la région du « Triangle Mineiro », du Sud de Goiás et du Sud-Est du Mato Grosso do Sul. Ces aires sont contiguës aux régions traditionnelles productrices de canne du Centre-Sud brésilien, comme le montre le graphique 24, et il est possible d'y développer des systèmes de production similaires à ceux existant à São Paulo.

Figure 24 – Localisation des nouvelles usines de sucre et d'éthanol au Brésil



Source : CGEE (2006).

D'après les chiffres de la récolte 2006/2007, l'agro-industrie de la canne à sucre, qui englobe la production de canne, de sucre et de bioéthanol, a généré en 2007 environ R\$ 41 milliards, en chiffres d'affaires directs et indirects. 420 millions de tonnes de canne ont été traitées, 30 millions de tonnes de sucre ont été produites, ainsi que 17,5 milliards de litres de bioéthanol, et ont été exportés 19 millions de tonnes de sucre (US\$ 7 milliards) et 3 milliards de litres de bioéthanol (US\$ 1,5 milliard). Ceci représente 2,65% du produit interne brut (PIB) national. En outre, les impôts et taxes perçus se sont élevés à R\$ 12 milliards et les investissements annuels en nouvelles unités agro-industrielles ont atteint R\$ 5 milliards [ProCana (2008)]. Ces résultats impressionnants furent atteints par un parc d'unités productives caractérisé par l'hétérogénéité quant à l'échelle de production, la taille, la localisation géographique, les structures de production et les profils financiers et administratifs. Dans ce contexte, il est naturel d'observer différents coûts de production et différents niveaux d'efficacité, résultant en particulier de l'évolution significative du secteur du sucre et de l'alcool au cours des dernières décennies, en termes de capacité, de profil productif et d'assouplissement de la norme régulatrice.

Les usines brésiliennes de sucre et de bioéthanol actuellement en opération peuvent être classées en trois groupes, en tenant compte de leur situation financière, des indicateurs de productivité et de l'introduction de technologies innovatrices (modifié de IEL/Sebrae, 2006) :

Entreprises stagnantes. Groupe constitué par des usines en situation critique ou pré-critique, à cause du volume des dettes accumulées et du déphasage technologique, avec des possibilités réduites de poursuivre leur activité de façon indépendante dans un secteur où la compétitivité interne est élevée. Seul l'apport de nouvelles ressources et de lignes de financement spécifiques pourra modifier cette situation, afin d'actualiser les technologies employées et de permettre l'augmentation de la productivité agro-industrielle.

Entreprises rentables. Groupe formé par les usines ayant réussi à affronter avec succès la fin de la réglementation sectorielle et l'indéfinition de la politique énergétique brésilienne, qui ont augmenté la capacité de production et investi dans les nouvelles technologies, obtenant une réduction de coûts et une augmentation de la productivité. Individuellement ou en groupes, quelques-unes de ces entreprises ont diversifié leurs activités pour la commercialisation et la logistique d'exportation de leurs produits.

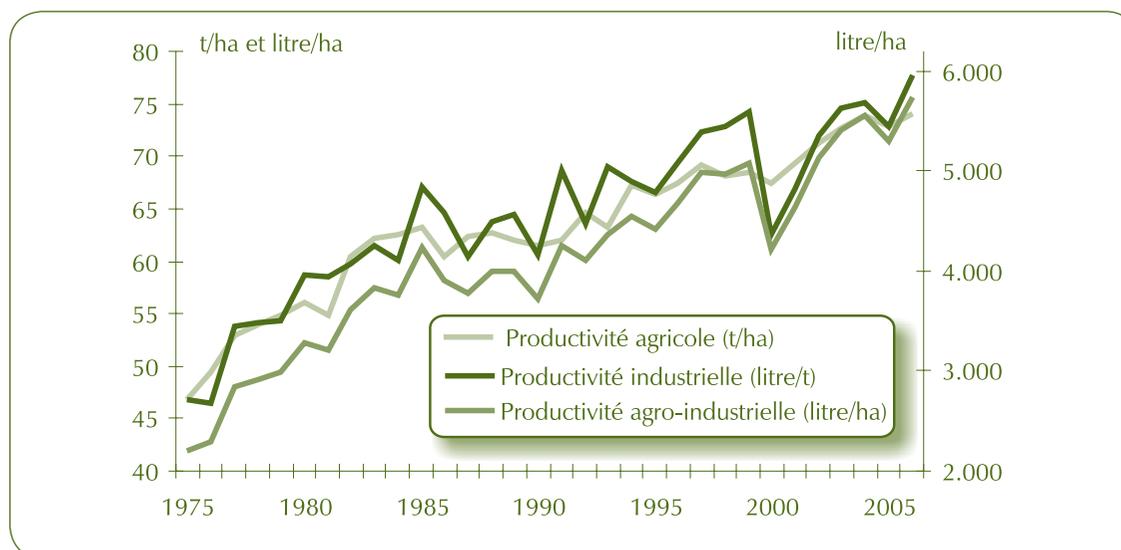
Entreprises innovatrices. Groupe constitué par la part des entreprises rentables qui, individuellement ou en partenariat avec des entreprises multinationales, se sont distinguées du groupe antérieur, en diversifiant leur base technologique pour la production de dérivés du sucre et en ouvrant de nouvelles perspectives pour l'agrégation de valeur à la canne à sucre.

Associée à l'expansion de la production de sucre et d'alcool, il s'est produit une diversification significative de la composition et de l'origine du capital investi dans l'agro-industrie, basé presque entièrement à l'origine sur des entreprises familiales, en bonne partie créées et administrées par des immigrants italiens et leurs descendants, dans la Région Centre-Sud, et par des familles de la région, dans le cas des usines du Nord-Est. Actuellement, outre les entreprises familiales, il a été observé l'ouverture du capital de diverses entreprises (Cosan, Costa Pinto, Guarani, Nova America, São Martinho) et l'entrée d'investisseurs stratégiques nationaux (Votorantim, Vale, Camargo Correa, Odebrecht) et étrangers, d'origine variée : française (Tereos, Sucden, Louis Dreyfus), allemande (Sudzucker), américaine (Bunge, Comanche Clean Energy, Cargill, Global Foods), espagnole (Abengoa), guatémaltèque (Ingenio Pantaleón), indienne (Bharat Petroleum, Hindustran Petroleum, India Oil), britannique (ED&F Man, British Petroleum), malaisienne (Kouk) et japonaise (Mitsui, Marubeni).

Une autre innovation dans ce secteur a été la présence importante d'investisseurs financiers, à nouveau nationaux et étrangers, comme Goldman Sachs, Merrill Lynch, Adeco (George Soros), Tarpon, UBS Pactual et Ceron, isolés ou en consortium avec des opérateurs. Dans ce dernier cas se trouvent des fonds formés spécifiquement pour mettre en oeuvre des plateformes de production et de commercialisation de bioéthanol de canne à sucre, comme Infinity Bio-Energy, Brenco (Entreprise Brésilienne d'Énergie Renouvelable) et Clean Energy Brazil. Le modèle typique des affaires avec capital étranger inclut des associés brésiliens, avec une participation importante d'entreprises étrangères dans des dizaines d'opérations d'acquisitions et de fusions réalisées ces dernières années. Bien qu'une telle diversification soit un processus de la plus grande importance, signe de la confiance des investisseurs et de

l'introduction de nouveaux concepts de gestion et de gouvernance, le capital étranger représente une parcelle mineure des investissements totaux dans ce secteur, estimé à 12% de la capacité de traitement installée en 2007 [Nastari (2007)].

Graphique 22 – Évolution de la productivité agricole, industrielle et agro-industrielle des usines de sucre et d'éthanol au Brésil



Source : Élaboré sur base de Mapa (2007) et Unica (2008).

Il est important de noter que l'expansion de la production de bioéthanol et de sucre au cours des dernières décennies s'est produite non seulement en raison de l'augmentation de la surface cultivée, mais également via des gains substantiels de productivité, dans les phases agricole et industrielle. Ces gains présentent des augmentations annuelles accumulées de 1,4% et 1,6%, respectivement, et ont eu comme résultat un taux de croissance annuelle de 3,1% dans la production de bioéthanol par hectare cultivé, au long de 32 ans, comme cela est présente au graphique 22, en valeurs moyennes pour toutes les unités de production brésiliennes. Pour cette figure, les données concernant la superficie plantée et la production de canne ont été fournies par le Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de l'Approvisionnement [Mapa (2007)] et la production de bioéthanol fut obtenue à partir des statistiques de l'Union de l'Industrie de la Canne à Sucre [Unica (2008)]. Grâce à ces gains de productivité, la superficie consacrée actuellement à la culture de la canne pour la production de bioéthanol, près de 3,5 millions d'hectares, représente 38% de la surface qui serait requise, si l'on compare la production actuelle et la productivité agro-industrielle observée au début du Pro-alcool, en 1975. Ce gain de productivité remarquable, qui multiplie par 2,6 le volume de bioéthanol produit par surface cultivée, fut atteint grâce à l'incorporation continue de nouvelles technologies, thème qui sera abordé dans le prochain sous chapitre.

La réduction progressive des coûts est une conséquence directe de l'évolution de la productivité. Elle est reflétée dans l'évolution des montants reçus par les producteurs (voir Le graphique 23) parfois décrite comme *learning curve*, figurant clairement un processus d'apprentissage et de consolidation similaire à celui présenté pour d'autres technologies énergétiques innovatrices, comme l'énergie éolienne [Goldemberg et al (2004)]. Dans cette courbe, l'axe des abscisses correspond à la production accumulée de bioéthanol dans les usines brésiliennes, montrant comment l'expérience et les gains d'échelle se sont traduits par une chute progressive des prix (en dollars américains constants, sur la base de 2002), avec une réduction annuelle accumulée de 1,9% pour les 25 dernières années. Un aspect important dans cette figure est la tendance asymptotique des prix, qui demeurent pratiquement constants ces dix dernières années, signal d'une maturité dans le domaine des technologies conventionnelles.

Graphique 23 – Evolution des prix payés aux producteurs d'éthanol au Brésil



Source : Adapté de Goldemberg et al. (2005).

Selon la même logique de croissance accompagnée de gains de productivité et de gains d'efficacité, l'évolution du segment du sucre et de l'alcool a été caractérisée par la formation de consortiums et de groupes d'unités de production (*clusters*) dans un but de rationalisation des coûts, en particulier dans les composants associés à l'adoption de nouvelles technologies. En outre, le secteur a augmenté les tailles de production des usines et a réalisé l'occupation stratégique de terres agricoles contiguës [CGEE (2005)]. En ce sens, la croissance de la capacité unitaire de traitement des nouvelles unités est remarquable, car, même

en atteignant plus de sept millions de tonnes de canne traitées par an (dans les plus grandes usines), elles ont réussi à maintenir le coût de transport de la canne à des niveaux compétitifs, grâce à l'utilisation de moyens de transport efficaces et à l'occupation en priorité des terres proches de l'unité industrielle. Il est intéressant de constater que ces unités agro-industrielles de plus grande taille correspondent, en termes énergétiques, à une raffinerie de pétrole d'une capacité de traitement de 35 mille barils par jour, c'est-à-dire d'une magnitude bien inférieure à celle observée dans l'industrie pétrolière actuelle.

A la fin de cet ouvrage se trouvent en annexes les séries historiques de données sur la production de bioéthanol (anhydre et hydraté), sur le produit et sur la surface de la canne récoltée (y compris pour les principaux états producteurs) et sur les prix payés aux producteurs de bioéthanol.

6.3 Recherche et développement technologique

Dans l'expansion de la production de bioéthanol par les usines brésiliennes, présentée antérieurement, l'incorporation de procédés innovateurs et le développement technologique ont joué un rôle essentiel, permettant l'augmentation de l'efficacité dans la production et la réduction progressive des impacts environnementaux. De même, les nouvelles possibilités de production bioénergétique à base de canne, avec l'emploi de sous-produits lignocellulosiques pour la production de bioéthanol et d'électricité, dépendent énormément de procédés encore en phase de développement.

Sur ce thème, il faut souligner l'importance actuelle et passée des institutions publiques, fédérales et des états, ainsi que celle des entreprises privées tournées vers l'accumulation de connaissances sur la chaîne de production du bioéthanol de canne à sucre, en particulier dans son étape agricole, incluant l'amélioration génétique, la mécanisation agricole, la gestion, le contrôle biologique des ravageurs, le recyclage des effluents et les pratiques agricoles durables de meilleur rendement [CGEE (2005)]. Ces institutions sont localisées, pour la plupart, dans l'État de São Paulo, où est aussi produite et traitée la majeure partie de la canne à sucre au Brésil, et où se situe le parc universitaire brésilien le plus important, responsable de près de la moitié des travaux scientifiques produits actuellement dans le pays. Cette co-localisation dans le même espace permet une intéressante synergie entre les nécessités de support technologique et les disponibilités de ressources humaines préparées pour les résoudre, synergie dans laquelle le gouvernement de l'État de São Paulo et le secteur privé interviennent comme les principaux acteurs de la création et de l'introduction d'innovations dans l'agro-industrie.

Les principaux exemples d'instituts de São Paulo actifs dans le domaine des technologies de production agro-industrielle et d'utilisation de bioéthanol de canne à sucre, financés par le gouvernement de l'État de São Paulo, sont : l'Institut Agronomique de Campinas (IAC), l'Institut de Recherches Technologiques (IPT), l'Institut de Technologie d'Aliments (ITAL), la Compagnie de Technologie d'Assainissement Environnemental (Cetesb), l'Institut Biologique,

et les trois universités de l'état de São Paulo – l'Université de São Paulo (USP), qui abrite l'École d'Agronomie Luiz de Queiroz (ESALQ) active traditionnellement dans la technologie de la canne à sucre, l'Université de Campinas (Unicamp) et l'Université de l'Etat de São Paulo Julio de Mesquita Filho (Unesp), avec divers cours et groupes de recherches tournés vers la bioénergie de la canne à sucre.

La plus ancienne de ces institutions, l'Institut Agronomique de Campinas, qui dispose de stations expérimentales dans les diverses régions de l'état, commença l'étude de la canne dès 1892. A une époque plus récente, renforçant son implication dans cette culture en association avec des entreprises privées, avec lesquelles il contribue à un budget annuel de R\$ 2 millions, l'IAC développe depuis 1994 un programme actif d'amélioration génétique de variétés de canne, le ProCana, qui lance périodiquement de nouvelles variétés et introduit de nouvelles méthodes de traitement des plantations de canne à sucre [Landell (2006)]. Ce programme a introduit avec succès d'innovatrices et efficaces pratiques de gestion de ses activités, lui permettant de dégager un impact économique 13 fois supérieur aux investissements [Hasegawa e Furtado (2006)].

Dans le secteur privé, se distingue le Centre de Technologie de la Canne à Sucre (CTC), créé en 1970 comme Centre de Technologie de la coopérative Copersucar. En 2005, il a pris l'indépendance de cette coopérative de producteurs de sucre et de bioéthanol, et est devenu une association civile de droit privé, sans but lucratif. Le CTC compte actuellement, comme associés, 174 usines et associations de fournisseurs de canne, responsables de 60% de la canne produite au Brésil. Il administre un budget annuel de R\$ 45 millions, avec un effectif de plus de 300 chercheurs [Furtado et al. (2008)]. Bien qu'actuellement ses travaux les plus visibles soient ceux élaborés dans le secteur agricole, avec plus de 70 variétés de canne lancées (cannes SP et CTC), cultivées dans 43% des plantations de canne dans le pays, le CTC intervient dans toute la chaîne productive de la canne à sucre, sur des thèmes tels que l'administration rurale, l'amélioration des variétés, la protection phytosanitaire, les systèmes de plantation et de récolte, les processus d'extraction et de fermentation et les systèmes d'énergie pour les usines de sucre et de bioéthanol. Le CTC a été la principale base d'innovations pour les usines de São Paulo et un support technique important en termes agricoles et industriels. Dans le domaine de la biotechnologie de la canne, le CTC développe des recherches depuis 1990. Pionnier au Brésil dans la création de variétés transgéniques de canne à sucre, il a dirigé en 1997, la constitution du Consortium International de Biotechnologie de la Canne à Sucre (ICSB), entité qui regroupe actuellement 17 institutions de 12 pays producteurs de canne. Récemment, furent installées des unités de recherche du CTC dans les états de Pernambuco et Alagoas, consacrées au développement de variétés pour ces régions [CTC (2008)]. En résumé, le CTC a été sûrement le leader dans l'introduction d'innovations dans l'agro-industrie du sucre et de l'alcool, et le principal responsable du gain notable d'efficacité dans la production de bioéthanol constaté ces dernières décennies .

Au niveau des institutions des états fédérés, il convient de mentionner spécialement la Fondation de Soutien à la Recherche de l'Etat de São Paulo (Fapesp), qui a joué un rôle très

important dans l'encouragement des activités de recherche et de développement dans le domaine de l'agro-industrie de la canne à sucre, avec un volume impressionnant de ressources investies dans plus d'une centaine d'études et de recherches impliquant la communauté académique et les entreprises du secteur, sur des thèmes de recherche de base et sur leurs applications [Fapesp (2007)]. Exemple d'initiatives récentes de la Fapesp avec des entreprises privées, qui apportent la moitié des ressources mises à la disposition pour le développement d'études par la communauté scientifique, les conventions signées avec Dedini Indústrias de Base et Braskem prévoient, respectivement, R\$ 100 millions pour des projets de recherche tournés vers les technologies de fabrication de bioéthanol et R\$ 50 millions pour les secteurs des procédés de synthèse à partir de matières premières renouvelables dérivées de sucres, de bioéthanol et d'autres produits de la chaîne des biocarburants, avec un accent sur les « polymères verts ». La Fapesp finance également le Programme Directives de Politiques Publiques pour l'Agro-industrie de la Canne à Sucre de l'Etat de São Paulo, consacré à la définition des soutiens aux actions du gouvernement dans ce domaine [Agência Fapesp (2008)].

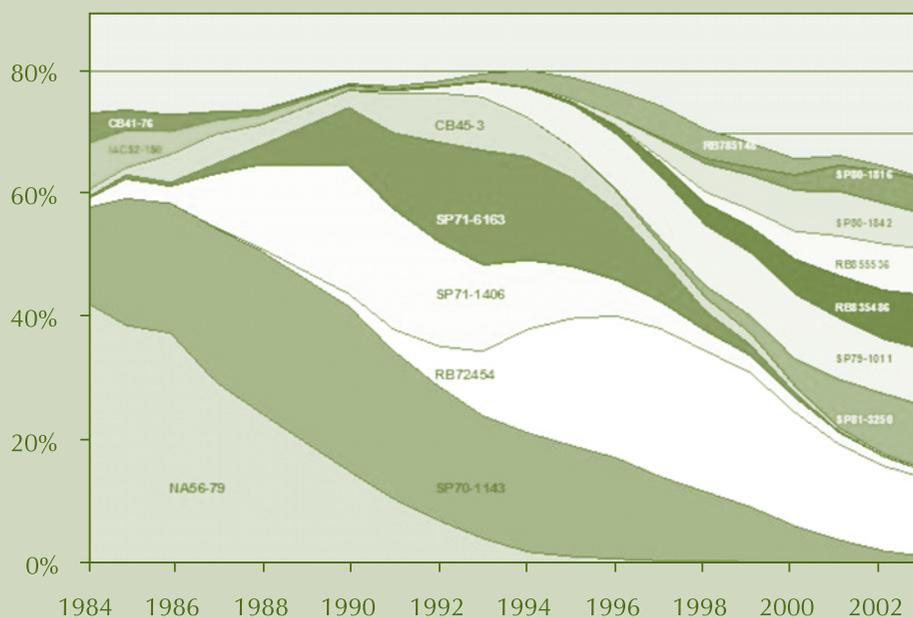
Liée au gouvernement fédéral et localisée dans une région traditionnelle de production de canne, l'Université Fédérale de São Carlos (UFSCar) a joué un rôle important dans le développement technologique de l'agro-industrie du bioéthanol, spécialement dans sa phase agricole. En 1990, le Centre de Sciences Agraires de cette université a absorbé le Programme National d'Amélioration de la Canne à Sucre (Planalsucar) de l'ancien Institut du Sucre et de l'Alcool, qui eut jusqu'à 30 stations expérimentales dans tout le pays, contribuant de manière importante à l'amélioration de la productivité de la canne dans les états du nord-est, en particulier dans l'état d'Alagoas [Furtado et al. (2008)]. Sur la base des ressources humaines et de l'infrastructure du Planalsucar, et afin d'assurer la continuité des recherches en amélioration génétique de la canne, a été créé en 1991 le Réseau Interuniversitaire pour le Développement du Secteur du Sucre et de l'Alcool (Ridesa). Ce réseau regroupe actuellement près de 140 chercheurs de neuf universités fédérales (Universités de São Carlos, Paraná, Viçosa, Rurale de Rio de Janeiro, Sergipe, Alagoas et Rurale de Pernambuco, Goiás et Mato Grosso) proches des anciennes stations expérimentales du Planalsucar. Conduit avec succès, ce programme a déjà lancé depuis sa formation 65 cultivars (cannes RB), responsables de 57% de la surface cultivée en canne au Brésil [Ridesa (2008)]. Outre le support du Ministère de la Science et de la Technologie, avec un budget de R\$ 1,8 million en 2006, le Ridesa

Amélioration génétique et disponibilité de cultivars

La santé végétale des plantations de canne à sucre implique la rénovation périodique et la diversité des variétés utilisées, en assurant le maintien de la productivité et la résistance aux maladies et aux déprédateurs, qui en des conditions de monoculture peuvent être assez nuisibles, outre les caractéristiques de précocité ou de maturation tardive l'adaptation à la coupe mécanisée et la résistance à certaines conditions climatiques,

entre autres. Dans ce sens, il est exemplaire de voir comment la technologie agronomique a permis l'augmentation de la base de germoplasme de la canne et la diversification de variétés utilisées dans l'agro-industrie brésilienne, à l'aide de quatre programmes d'amélioration de la canne, deux d'entre eux privés. On observe que, de par la Loi 9.456/1997 – la Loi des Cultivars –, les entreprises et les groupes de recherche peuvent se faire payer par les producteurs de canne pour la culture des variétés développées. A chaque année, près de six nouvelles variétés sont lancées sur le marché, de sorte que dans l'actualité, on cultive près de 500 variétés. Parmi celles-ci, la plus utilisée occupe 12,6% de la surface plantée, comme on peut l'observer à la figure ci-dessous.

Figure 25 – Occupation en pourcentage des principales variétés de canne à sucre au Brésil de 1984 à 2003



Source : Burnquist e Landell (2005).

Dans un programme d'amélioration génétique de la canne à sucre, le point de départ est la banque de germoplasme, qui rassemble des milliers de génotypes, entre les cultivars utilisés dans le pays, d'autres espèces en rapport avec le genre *Saccharum* et des cultivars importés de différentes régions de plantations de canne à sucre dans le monde. Après avoir été obtenues au moyen de croisements pré-établis par les chercheurs, les semences sont envoyées aux laboratoires et aux stations expérimentales, où sont produits les plants, qui une fois transplantés sur le terrain, passent par des phases successives de sélection durant trois à quatre ans, et on choisit quelques centaines de clones à partir de millions de plants. Les clones sélectionnés sont alors cultivés en tests de longue durée. Normalement, le lancement de nouvelles variétés a lieu après environ 13 ans d'innombrables

évaluations des clones à l'aide d'expériences, en observant leur réaction aux maladies et aux déprédateurs dans différentes ambiances de production [Ridesa (2008)].

Sur base de la séquence des 50 mille gènes de la canne, développée entre 1988 et 2001 dans le Projet Génome Canne à Sucre, parrainé par la Fapesp, divers groupes brésiliens travaillent à l'aide de méthodes biotechnologiques avancées pour définir plus rapidement les clones dotés de la meilleure résistance aux maladies, la précocité, la saccharose, la biomasse totale etc. Cependant, outre les difficultés techniques, ces études dépendent des autorisations soumises à de longues formalités auprès de la Commission Technique Nationale de Biosécurité du Ministère de la Science et de la Technologie.

compte 130 entreprises partenaires, qui apportent des ressources et bénéficient des résultats [Inovação Unicamp (2007)].

Parmi les institutions fédérales situées à São Paulo doit être mentionnée également les unités de l'Entreprise Brésilienne de Recherche dans l'Agriculture et l'Élevage : Unité Embrapa Environnement, à Jaguariúna, travaillant sur des thèmes associés à la réhabilitation des terres dégradées, l'utilisation durable des ressources hydriques et le contrôle biologique des déprédateur et des maladies ; Unité Embrapa Surveillance par Satellite et Unité Embrapa Informatique Agriculture et Elevage, installées toutes deux à Campinas, qui travaillent sur des applications de la télédétection, sur le géo-traitement et l'informatique, toutes exerçant une activité en rapport avec l'agro-industrie de la canne à sucre. Avec la création en 2006, de l'Unité Embrapa Agroénergie, dont le siège est à Brasília, cette institution va certainement s'intéresser d'avantage à la thématique du bioéthanol et à la bioélectricité de canne à sucre.

Il faut citer, pour finir mais non pas à cause d'une moindre importance parmi les entreprises privées actives dans le recherche et le développement technologique dans ce domaine, CanaVialis et Allelyx, localisées à Campinas et soutenues par le fonds d'investissements Votorantim Ventures. Selon ces entreprises, près de R\$ 70 millions sont investis chaque année en recherches, notamment pour un programme d'amélioration de variétés en utilisant la technique de la transgénèse, selon laquelle des gènes d'individus différents sont insérés dans le génome de la canne pour obtenir des variétés plus productives et plus résistantes aux maladies et à la sécheresse. Pour développer ses activités et exécuter les contrats signés avec 34 usines, CanaVialis possède trois stations expérimentales certifiées par la Commission Technique Nationale de Biosécurité (CTNBio). Ensemble, les deux entreprises ont un effectif de plus de 150 chercheurs et se consacrent à d'autres applications de la biotechnologie dans l'agro-industrie de la canne, comme les marqueurs moléculaires et les systèmes avancés de gestion variétale, avec une évaluation de la vulnérabilité génétique [Furtado et al. (2008) et CanaVialis (2008)].

Cette ample base technologique fut très active dans le développement de procédés, d'équipements et de systèmes. Elle a été réalimentée et sa ligne d'études et de recherches stimulées par la réalité tangible et immédiate de l'agro-industrie voisine, durant ces dernières décennies. C'est ainsi qu'il est difficile d'affirmer quel aurait été le facteur déclencheur de cette dynamique d'innovation ; en fait, il y eut un processus parallèle et simultané de génération et d'application d'investissements : d'avantage de connaissance appliquée, de meilleures technologies, une efficacité plus grande, des gains plus importants, de meilleures perspectives et une motivation des entreprises et des institutions. Confirmant cette vision, une synthèse des résultats obtenus et des perspectives de nouveaux progrès, en termes de productivité agricole (production annuelle de canne par hectare planté) et industrielle (production de bioéthanol par tonne de canne traitée), est présentée au Tableau 26, et le Tableau 27 fournit quelques détails sur les procédés proposés pour améliorer la productivité industrielle.

Tableau 26 – Impact de l'introduction de nouvelles technologies dans la production de bioéthanol

| Période | | Productivité | | |
|--------------------|--|-----------------|------------------------|------------------------------|
| | | Agricole (t/ha) | Industrielle (litre/t) | Agro-industrielle (litre/ha) |
| 1977–1978 | Phase initiale du Programme National de l'Alcool Faibles efficacités du procédé industriel et de la production agricole | 65 | 70 | 4.550 |
| 1987–1988 | Consolidation du Programme National de l'Alcool La productivité agricole et la productivité industrielle augmentent significativement | 75 | 76 | 5.700 |
| Situation actuelle | Procédés de production de bioéthanol opérant avec la meilleure technologie disponible. | 85 | 80 | 6.800 |
| 2005–2010 | Première étape d'optimisation des procédés | 81 | 86,2 | 6.900 |
| 2010–2015 | Deuxième étape d'optimisation des procédés | 83 | 87,7 | 7.020 |
| 2015–2020 | Troisième étape d'optimisation des procédés | 84 | 89,5 | 7.160 |

Source : CGEE (2006).

Tableau 27 – Expectatives de gains d'efficience dans les processus de la production de bioéthanol

(En %)

| Situation (suivant Tableau 26) | Pertes a lavage de la canne | Efficience de l'extraction | Pertes au traitement du jus | Rendement dans la fermentation | Pertes à la distilla- tion et vinasse |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--|
| Situation actuelle | 0,50 | 96,0 | 0,75 | 90,3 | 0,50 |
| Première étape d'optimisation | 0,40 | 96,5 | 0,75 | 91,0 | 0,50 |
| Deuxième étape d'optimisation | 0,30 | 97,0 | 0,50 | 91,5 | 0,25 |
| Troisième étape d'optimisation | 0,25 | 98,0 | 0,35 | 92,0 | 0,20 |

Source : CGEE (2006).

Comme indiqué dans les Tableaux 26 et 27, l'augmentation prévue pour la productivité agro-industrielle, sans prendre en considération l'introduction d'autres systèmes pour la production, comme le bioéthanol cellulosique, devra permettre, au cours des prochaines années, une réduction 3,4% de la superficie plantée par unité de bioéthanol produit, ce qui représente un impact important de la recherche et du développement technologique dans cette agro-industrie. En considérant également la production de bioéthanol à base de résidus cellulosiques, la productivité pourrait atteindre, dans ce même horizon de temps, 10.400 litres de bioéthanol par hectare [CGEE (2005)], ce qui correspond à une réduction de 33% de la superficie plantée par unité de bioéthanol produit.

Tandis que les résultats du perfectionnement des processus dans les secteurs industriel et administratif peuvent être reproduits, généralement entre différentes régions, pour la production de la canne, les variables édaphoclimatiques exercent une influence décisive et il y a une plus grande spécificité régionale, qui impose le développement décentralisé de programmes d'amélioration et induit la coopération entre entreprise et l'échange entre institutions pour rationaliser les coûts. En outre, il est opportun de commenter comment ces innovations ont été diffusées auprès des usines de sucre et de bioéthanol. Une étude détaillée de l'évolution de l'agro-industrie de la canne à sucre du Paraná entre 1990 et 2005 a montré la grande importance de l'interaction directe entre les instituts et les fournisseurs de technologie et les entreprises utilisatrices, et le *learning-by-interacting* est le type d'apprentissage prédominant dans ce secteur [Rissardi Jr. e Shikida (2007)]. Cette constatation met en valeur encore d'avantage l'existence de centres technologiques régionaux ou décentralisés.

Dans ce contexte, il est nécessaire de renforcer les liens déjà existants entre les organisations de divers pays ayant un effectif potentiel pour la production efficiente de bioéthanol, de manière à créer les bases correctes pour le développement adéquat de leur agro-industrie bioénergétique. En Amérique Latine, les institutions suivantes, entre autres, constituent d'im-

portantes bases pour la promotion de la diversité et de la productivité dans l'agriculture de la canne à sucre : le Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (Cengicaña), le Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), la Dirección de Investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (Dieca), en Costa Rica, et la West Indies Central Sugar Cane Breeding Station, aux Barbades, cette dernière station possède une banque de germoplasme renommée qui dessert toute la région des Caraïbes.

Dans le but également de rationaliser les activités de recherche et développement en bioéthanol, des priorités ont été établies. Pour les conditions du Centre-Sud brésilien [Macedo e Horta Nogueira (2007) et CGEE (2007b)], les thèmes considérés comme plus importants sont les suivants :

- a. procédés de récupération et d'utilisation des excédents de la paille et de la bagasse ;
- b. développement de variétés transgéniques de canne ;
- c. sélection de cultivars (amélioration conventionnelle pour l'adaptation à de nouvelles zones de production, adoption du concept de la canne-énergie, qui vise à maximiser le résultat global en terme de production d'énergie par le traitement du sucre et de la fibre) ;
- d. développement d'équipements et de procédés pour l'extraction du jus, le traitement, la fermentation et la séparation du bioéthanol ;
- e. systèmes d'agriculture de précision, où les interventions dans la culture sont définies à l'aide de techniques de géo-référencement et de systèmes de positionnement global (GPS – *global positioning systems*) ;
- f. contrôles biologiques de ravageurs et de maladies ;
- g. systèmes de culture de la canne adaptés à la récolte mécanique ;
- h. nouveaux produits et procédés de sucre-chimie et alcool-chimie ;
- i. utilisation finale de bioéthanol : perfectionnements de la technologie de moteurs à biocarburant et des cellules à combustible opérant avec du bioéthanol.

L'expérience brésilienne et, en particulier, celle de l'Etat de São Paulo dans le financement des activités de recherche et développement dans l'agro-industrie de l'éthanol indiquent qu'il est nécessaire non seulement de pourvoir aux ressources à un niveau suffisant, mais aussi de prendre les initiatives ci-après : structurer un plan d'action avec des objectifs et des compétences clairs, en établissant une gestion coordonnée des diverses activités et en prévoyant des mécanismes de suivi et de diffusion des résultats ; renforcer les programmes de formation du personnel, spécialement au niveau de la post-graduation ; promouvoir des pro-

grammes d'unités-pilote semi-commerciales et des unités de démonstration pour les nouvelles technologies ; et, finalement, mettre en valeur les structures existantes, afin de consolider les centres actuellement actifs (éventuellement, en incorporant de nouveaux laboratoires et équipements), en plus de promouvoir et d'organiser la formation disponible.

Considérée comme une des formes d'organisation possibles permettant de financer durablement les activités de recherche et développement dans le domaine de l'agro-industrie énergétique, il a été suggéré de constituer un fond dénommé CT-Ethanol, dont l'objectif spécifique serait de financer des études de base et des applications dans toute la chaîne de production des biocarburants. De la sorte, il serait possible de reproduire les bons résultats obtenus avec les « Fonds Sectoriaux », dans lesquels une part des ressources produites dans un secteur énergétique déterminé (pétrole, énergie électrique) est utilisée pour la production et le regroupement de connaissance dans ce même secteur. Avec l'application d'un taux de prélèvement de 0,5% sur la recette nette de la vente du bioéthanol, il est estimé possible de collecter près de R\$ 185 millions, ce qui aideraient à assurer le dynamisme technologique de ce secteur [Cortez (2007)].

Durant la préparation de ce livre, le Ministère de la Science et Technologie a annoncé la création du Centre de Science et Technologie du Bioéthanol (CTBE), qui devra fonctionner dans le Pôle Technologique de Campinas, et va se consacrer à un large éventail de technologies d'intérêt pour la conversion efficace de la biomasse en énergie. Actuellement en phase de structuration, ce centre devra comporter des laboratoires pour la recherche de base et une usine-pilote, et prévoit un effort accentué sur les études de base du phénomène de la photosynthèse, sur les systèmes de production de biomasse et sur des processus avancés pour la production de biocarburants, comme l'hydrolyse.



Chapitre 7

Durabilité du bioéthanol de canne à sucre : l'expérience brésilienne

Dans le contexte actuel, il est de plus en plus impératif que les systèmes énergétiques soient non seulement renouvelables au niveau conceptuel, mais également durables. Ainsi, comme l'a défini la Commission Brundtland dans les années 1980, les systèmes énergétiques doivent être capables de « répondre aux nécessités des générations actuelles sans mettre en jeu celles de l'avenir, tout en observant l'équilibre social et écologique, ainsi que les nécessités des plus pauvres » [United Nations (1987)]. Cependant, déterminer la durabilité d'un système énergétique n'est pas une tâche simple car il dépend non seulement de son vecteur énergétique, mais, fondamentalement, du contexte de sa production et de son utilisation. En général, il est plus simple de démontrer la non-durabilité d'un système énergétique (non-renouvelable, polluant etc.) que de garantir la durabilité de systèmes basés sur des énergies renouvelables, principalement dans le cas des bioénergies.

Bien que le débat sur la durabilité des bioénergies soit en cours et qu'il se polarise fréquemment entre des visions utilitaires et préservationnistes, la mise à profit par les sociétés humaines des flux énergétiques associés à la production végétale est pratiquée depuis des millénaires au moyen de l'agriculture dans les écosystèmes les plus divers. Cette production doit être considérée effectivement comme une alternative énergétique, qui devrait être mieux connue et promue dans les contextes où elle se révèle adéquate. C'est l'objet de ce chapitre qui présente la production de bioéthanol de canne à sucre sous le prisme de la durabilité, définie comme la possibilité pour les systèmes bioénergétiques de maintenir leur production à long terme, sans diminution sensible des ressources qui sont à son origine, comme la biodiversité, la fertilité du sol et les ressources hydriques. Ce thème se base sur une

des définitions classiques de la durabilité : « condition dans laquelle la production peut être maintenue indéfiniment sans dégrader les stocks de capital, y compris les stocks de capital naturel » [Goodland (1992)].

Après la Conférence des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement, le Sommet de la Terre, tenu à Rio de Janeiro en 1992, la durabilité commença à être considérée sur ses trois piliers – environnemental, social et économique –, pour devenir un concept d'ample utilisation et de présence permanente dans les débats sur les perspectives de croissance des pays. Dans cette logique, le présent chapitre aborde la durabilité depuis sa perspective environnementale globale, et analyse les aspects relatifs à la viabilité économique et sociale de ce biocarburant, en se reportant toujours au cas brésilien, modèle qui, en principe, peut être reproduit dans d'autres pays disposant de terres cultivables en suffisance et de conditions édaphoclimatiques similaires. Comme thèmes appartenant à la problématique de la durabilité, on discutera aussi de l'utilisation du sol et du zonage agro-écologique pour la culture de la canne à sucre au Brésil, ainsi que les progrès et les perspectives en rapport avec la certification des biocarburants.

7.1 L'environnement et l'énergie de la canne à sucre

Comme premier point à mentionner concernant les implications environnementales de la production de bioéthanol, il est fondamental de prévoir l'existence d'une législation qui oriente les producteurs vers les meilleures pratiques et qui réprime les actions qui dégradent l'environnement. Dans ce but, il est nécessaire, pour l'implantation et l'opération d'usines de sucre et de bioéthanol au Brésil selon les termes de la Résolution Conama 237/1997, que soient accomplies correctement les trois phases des formalités d'obtention de licence environnementale, caractérisées par l'obtention des autorisations suivantes :

- a. Licence Préalable (LP) – approuve la localisation et la conception et établit les exigences de base et les conditions à observer pour les phases suivantes.
- b. Licence d'Installation (LI) – autorise l'installation et inclue les mesures de contrôle environnemental.
- c. Licence d'Opération (LO) – autorise l'opération après l'accomplissement des exigences fixées par les licences antérieures, et doit être renouvelée périodiquement.

Les documents de base pour ce processus d'obtention de licence sont l'Étude d'Impact Environnemental et le Rapport respectif d'Impact sur l'Environnement (EIA/Rima). Il est obligatoire de réaliser une audience publique pour leur présentation et la définition d'une compensation environnementale, comme par exemple la plantation d'espèces natives ou la formation d'une réserve naturelle permanente. Les exigences présentées pour l'instruction de ces études et les exigences à observer sont établies par la législation de manière progressive, en fonction de la capacité de traitement des unités agro-industrielles. Dans le cas de projets de moindre capacité (ou d'altération du processus) qui ne constituent pas une cause potentielle d'impacts environnementaux comme l'augmentation de systèmes cogénération, un Rapport Environnemental Préliminaire peut être exigé (RAP), suivant une procédure simplifiée.

On trouvera ci-après des commentaires sur les thèmes les plus importants associés aux impacts environnementaux de la canne et du bioéthanol, comme les émissions à effet global (gaz à effet de serre) et local (associées spécialement au brûlage pré-récolte de la canne), l'utilisation de l'eau et la disposition des effluents (y compris la vinasse), l'utilisation de produits phytosanitaires et de fertilisants, l'érosion et la protection de la fertilité du sol et de la biodiversité, gardant toujours en vue la réalité de l'agro-industrie brésilienne de la canne.

Emissions de gaz à impact global

En raison du rendement photosynthétique observé dans la production de la canne à sucre et du processus efficient pour sa conversion en biocarburant, l'utilisation de bioéthanol obtenu à partir de cette matière première permet de réduire dans une mesure importante, les émissions de gaz à effet de serre, en comparaison avec l'utilisation du combustible fossile (essence), pour un même effet utile final dans les véhicules.

Cette contribution à la réduction du changement climatique est probablement un des aspects les plus importants associés au bioéthanol de canne à sucre. Ce thème a été présenté en détail au paragraphe 3.5 (Productivité, émissions et bilans énergétiques), dans lequel non seulement on expose l'impact positif évident apporté par l'éthanol de canne à sucre, mais où on observe également comment les autres matières premières sont peu efficaces dans ce sens, avec les technologies employées actuellement.

Le Tableau 28 présente une synthèse du bilan de carbone, avec les émissions de gaz carbonique dans la production et l'utilisation du bioéthanol, pour les conditions typiques de cette agro-industrie, sans prendre en considération les autres gaz ni les effets de second ordre, en tenant compte de toutes les opérations de production et d'utilisation sous les conditions observées dans la région du Centre-Sud brésilien. Les valeurs présentées dans ce tableau ont été calculées en tenant compte de la composition des divers produits de la canne et des bilans de masse observés actuellement dans l'agro-industrie. Ces montants tiennent compte aussi du fait que l'on doit traiter 12,5 tonnes de canne pour obtenir mille litres de bioéthanol. Grâce aux progrès prévus, ces résultats devront encore s'améliorer.

Tableau 28 – Bilan résumé des émissions de gaz carbonique dans l'agro-industrie du bioéthanol de canne à sucre dans le Centre-Sud brésilien (kg/mille litres de bioéthanol)

| Étape | Absorption de CO ₂ dans la photosynthèse | Libération de CO ₂ | |
|--------------------------|---|-------------------------------|------------------|
| | | Fossile | Photosynthétique |
| Plantation | | 173 | |
| Croissance | 7.464 | | |
| Récolte et transport | | 88 | 2.852 |
| Fabrication d'éthanol | | 48 | 3.092 |
| Utilisation de l'éthanol | | | 1.520 |
| Total | 7.464 | 309 | 7.464 |

Source : Élaboration de Luiz Augusto Horta Nogueira.

Comme on peut l'observer, le carbone libéré dans l'atmosphère correspond à la somme du carbone d'origine photosynthétique, absorbé durant la croissance de la canne et libéré ensuite en quatre étapes – dans le brûlage de la paille, dans la fermentation (conversion des sucres en bioéthanol), dans le brûlage de la bagasse dans les chaudières et dans le brûlage du bioéthanol dans les moteurs –, et du carbone d'origine fossile, qui correspond à un apport liquide dans l'atmosphère, résultat des opérations agricoles et industrielles et de la production d'intrants et d'équipements. De la sorte, seul le carbone d'origine fossile doit être pris en considération, puisque le carbone photosynthétique libéré correspond à celui qui est absorbé par la canne. Si l'on compare l'apport liquide des émissions fossiles, de l'ordre de 309 kg

de CO₂ par mille litres de bioéthanol produit, avec l'émissions estimée pour l'essence, 3.009 kg de CO₂ (y compris une augmentation de 14% dans les émissions lors de la production), et en supposant un rendement identique d'utilisation finale, il en résulte une réduction de l'ordre de 90% dans les émissions de carbone. Ces valeurs ne changent pas de manière substantielle quand on considère les effets de second ordre, associés à d'autres gaz en plus du dioxyde de carbone, comme il est déterminé au paragraphe 3.5 (mentionné plus haut). Des résultats similaires, qui renforcent les avantages environnementaux différenciés du bioéthanol de canne à sucre en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre et donc, une atténuation du changement climatique, ont été présentés dans diverses études [Concawe (2007), Esmap (2005) et IPCC (2008)].

Conformément au Communiqué Brésilien à la Convention-Cadre des Nations Unies pour le Changement du Climat, avec les chiffres de 1994, l'utilisation de l'énergie de la canne a réduit de 13% les émissions de carbone de tout le secteur énergétique. Pour les volumes de production de cette agro-industrie au Brésil, en 2003, la substitution de l'essence par l'éthanol et la production d'énergie à partir de la bagasse, ont réduit les émissions de CO₂ dans un volume équivalent de 27,5 millions et 5,7 millions de tonnes [Goldemberg et al. (2008)]. En se référant à des calculs selon des situations similaires, pour chaque 100 millions de tonnes de canne destinés à des fins énergétiques, on pourrait éviter l'émission de 12,6 millions de tonnes de CO₂, équivalents, en prenant en considération l'éthanol, la bagasse et l'excédent additionnel d'énergie électrique fournie au réseau [Unica (2007)].

Emissions de gaz d'impact local

Dans la production du bioéthanol, les émissions de polluants d'impact local qui préoccupent sont associées essentiellement au brûlage de la paille de la canne pré-récolte et aux émissions dans les cheminées des chaudières. Le brûlage de la paille augmente la productivité de la récolte, mais il est considéré comme un problème environnemental qui affecte principalement les villes situées dans les régions de culture de canne à sucre. Pour cette raison, il existe une forte disposition des organismes publics brésiliens en faveur de la restriction de cette pratique, ce qui implique, indirectement, l'élimination de la coupe manuelle qui s'avère assez difficile dans le cas de la canne sans brûlis.

Le meilleur exemple de cette situation peut être trouvé à São Paulo, où la Loi de l'État 11.241 de 2002, a fixé un chronogramme pour la récolte de la canne sans brûlis dans toutes les cultures mécanisables d'ici à 2021, afin de permettre que les aires restantes et inférieures à 150 hectares effectuent des brûlis jusqu'en 2031. En vertu de pressions exercées par les entités de protection de l'environnement et par le Ministère Public, un protocole signé entre le gouvernement de l'État de São Paulo et l'agro-industrie de la canne à sucre a anticipé ces délais, les fixant à 2014 et 2017 respectivement, avec des restrictions additionnelles pour le brûlis dans les zones d'expansion. Dans ce sens, l'autorisation pour l'entrée en opération des 56 nouvelles unités de production d'éthanol à São Paulo, à partir de 2008, a été soumise à la condition de l'adoption intégrale de la récolte de la canne sans brûlis. Les résultats de ce

processus ont été constatés clairement au moyen d'une surveillance à distance par satellite, et montrent que la récolte de canne sans brûlis a atteint 47% de la superficie de la récolte à São Paulo pour la récolte 2007/2008, évitant ainsi l'émission de 3.900 tonnes de matériaux en particules [Cetesb (2008)]. Dans d'autres états, comme Goiás et Mato Grosso, on observe des initiatives similaires, qui fixent des chronogrammes pour l'élimination des brûlis, mais les résultats n'ont pas encore été mesurés. Outre les questions environnementales, la possibilité d'utiliser l'énergie de la paille pour produire de l'énergie électrique est également un facteur d'encouragement pour l'adoption de la récolte de canne sans brûlis.

Avec l'introduction de chaudières modernes dans les usines, avec un excédent d'air moins élevé et en brûlant la bagasse sous des températures de flamme plus élevées, les teneurs en oxydes de nitrogène dans les gaz de cheminée atteignent des niveaux similaires à ceux observés dans d'autres systèmes thermiques de puissance, et ont commencé à être contrôlées par les organismes environnementaux, en vertu de la législation applicable, qui fixe des limites et des pénalités pour de telles émissions (Résolution Conama 382, de 2006). Dans ce contexte, les émissions des chaudières peuvent et ont été effectivement diminuées au moyen de systèmes conventionnels de nettoyage des gaz de cheminée, avec des résultats positifs, et pour cette raison, cela ne semble pas être un problème important dans le cas de l'agro-industrie du bioéthanol.

Utilisation de ressources hydriques et disposition d'effluents

Du point de vue des ressources hydriques, les conditions particulièrement favorables dans les pays des régions tropicales humides, comme c'est le cas du Brésil, avec un régime pluvial abondant et bien distribué, permettent à la majorité des cultures de se développer sans irrigation. Dans le cas du Brésil, on estime que les terres agricoles irriguées représentent 3,3 millions d'hectares, environ 4% de la superficie cultivée. L'écoulement moyen annuel des eaux sur le territoire brésilien est de 5.740 km³, face à une consommation estimée de 55 km³, donc inférieure à 1% des nécessités et permettant une offre annuelle de 34.000 m³ d'eau par habitant [Souza (2005a)]. Cependant, il existe des régions brésiliennes où les disponibilités annuelles sont inférieures à 1,5 m³ d'eau par habitant, ce qui caractérise une situation critique d'approvisionnement en eau. La mise en oeuvre de systèmes d'octroi et de perception pour l'utilisation de l'eau par les Comités de Bassin est en cours, selon les termes de la Loi 9.433/1997, la Loi des Eaux, qui devra encourager son utilisation plus responsable et la réduction des lancements de polluants dans les corps hydriques, selon l'application du principe « pollueur-payeur ».

Selon le climat, la culture de la canne requiert de 1.500 mm à 2.500 mm de couche d'eau distribuée de forme adéquate (une période humide et chaude pour la croissance et une période sèche pour la maturation et l'accumulation de sucre) durant le cycle végétatif. Au Brésil, l'irrigation de la canne n'est pratiquement pas utilisée dans la Région Centre-Sud, et n'est adoptée que durant les périodes plus critiques dans la région Centre-Ouest et, de manière un peu plus fréquente, dans la région Nord-Est, suivant l'idée d'« irrigation de se-

cours », après la plantation de la canne, pour garantir la germination sous des conditions de déficit hydrique, et comme « irrigation supplémentaire », faite à l'aide de différentes couches d'eau aux époques plus critiques du développement du végétal [Souza (2005a)]. L'on croit que, au fur et à mesure que les aires disposant d'une moindre disponibilité hydrique commencent à être occupées par des cultures de canne à sucre l'irrigation pourra se montrer intéressante pour maintenir la productivité agricole, et devra, dans ce cas, être effectuée dans le cadre de la législation en vigueur. Actuellement, selon les critères de Embrapa, la culture de la canne ne présente pas d'impact sur la qualité de l'eau [Rosseto (2004)].

Dans le contexte du processus industriel, outre le volume capté pour le traitement de la canne, un volume d'eau important entre dans l'usine avec la canne elle-même, puisque 70% du poids des chaumes est constitué d'eau. Ainsi, bien que l'on estime une consommation de processus de l'ordre de 21 m³ par tonne de canne traitée, le captage et le lancement d'eau sont bien inférieurs. Pour ce qui concerne les utilisations, 87% de la consommation d'eau se produit en quatre processus : lavage de canne, condensateurs à jets multiples dans l'évaporation et les opérations sous vide, le refroidissement de dômes et de condensateurs d'alcool. Avec la rationalisation de la consommation de l'eau (réutilisations et fermeture de circuits et quelques changements de processus, comme le nettoyage à sec et la réduction du lavage de la canne, en fonction de la coupe mécanisée), le captage a été réduit de manière significative. Les relevés effectués en 1997 et 2005 révélaient une réduction moyenne du captage de 5 m³ à 1,83 m³ par tonne de canne traitée, avec des espoirs d'atteindre à moyen terme 1 m³ par tonne de canne traitée [Elia Neto (2005)].

Les principaux effluents liquides observés dans la production de bioéthanol et leurs systèmes de traitement sont présentés dans le Tableau 29. Un relevé fait dans 34 usines révèle que le traitement utilisé réduit la charge organique de 98,40%, avec un solde restant de 0,199 kg DBO/t canne [Elia Neto (2005)]. La ferti-irrigation, au moyen de laquelle on applique la vinasse dans les cultures de canne à sucre, est la principale forme de disposition finale de la charge organique, avec des avantages sur les plans de l'environnement et de l'économie. Étant donné son importance, il convient d'analyser un peu plus la question de la vinasse.

La vinasse, produite à raison de 10,85 litres par litre de bioéthanol, constitue le plus important effluent liquide de l'agro-industrie de la canne. Dans sa composition, elle présente des teneurs élevées en potassium (près de 2 kg par m³) et de matière organique, mais elle est relativement pauvre en autres éléments nutritifs. Au début du Pro-alcool, la vinasse était lancée directement dans les rivières, causant de graves problèmes à l'environnement, atténués grâce à l'utilisation de bassins d'infiltration et résolu à partir de 1978, avec les systèmes de ferti-irrigation.

La zone des plantations de canne à sucre touchée par la ferti-irrigation dépend de la topographie et de la distribution des terres de l'usine – certaines usines appliquent la vinasse sur 70% de leur superficie cultivée et d'autres ont des valeurs bien moins élevées. Actuellement, on cherche à étendre cette superficie couverte par la vinasse, en vue d'augmenter la producti-

tivité agricole et de réduire l'utilisation de fertilisants chimiques, ce qui a entraîné l'utilisation de doses de moins en moins importantes, diminuant ainsi les risques de salinisation et de contamination de la nappe phréatique [Souza (2005b)]. Parmi les usines de la région de São Paulo, prédominent les systèmes de pompage et d'aspersion pour l'application de vinasse, bien que l'on emploie également des camions-citerne conventionnels pour sa distribution.

Tableau 29 – Effluents liquides de l'agro-industrie du bioéthanol

| Effluent | Caractéristiques | Traitement |
|---|---|---|
| Eau de lavage de la canne | Moyen potentiel polluant et concentration élevée de solides | Décantation et lagunes de stabilisation pour le cas de lancement en des corps d'eau. Dans la réutilisation, le traitement consiste en décantation et correction du pH |
| Eaux des jets multiples et des condensateurs barométriques | Bas potentiel polluant et haute température (~ 50° C). | Réservoirs d'aspersion ou tours de refroidissement, avec recirculation ou lancement |
| Eaux de refroidissement de dômes et de condensateurs d'alcool | Haute température (~50° C) | Tour de refroidissement ou réservoirs d'aspersion pour retour ou lancement |
| Vinasse et eaux résiduelles | Grand volume et charge organique élevée | Application sur la plantation de canne, conjointement avec les eaux résiduelles |

Source : Elia Neto (2005).

Des études de longue durée sur les effets de l'application de vinasse dans les plantations de canne à sucre, prenant en considération la lixiviation des éléments nutritifs et les possibilités de contamination des eaux souterraines, confirment ses bénéfices pour les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, comme l'élévation du pH, l'augmentation de la capacité d'échange cationique et de la disponibilité de certains éléments nutritifs, l'amélioration de la structuration du sol, l'augmentation de la rétention de l'eau et du développement de la microflore et de la microfaune du sol. En effet la vinasse, utilisée à des taux adéquats (inférieurs à 300 m³ par hectare) en respectant les caractéristiques des sols où elle est appliquée et la localisation des sources d'eau, non seulement fournit de l'eau et des éléments nutritifs, mais elle agit aussi comme récupératrice de la fertilité du sol, même en profondeur [Souza (2005b)]. Actuellement, la vinasse est considérée comme un fertilisant organique et est libérée pour la production de sucre « organique », dans lequel on ne peut utiliser des intrants chimiques tels que : herbicides, insecticides et engrais minéraux.

Quelques régions de l'État de São Paulo, productrices traditionnelles de canne à sucre, sont situées dans des zones vulnérables au niveau de l'environnement, comme des points de

recharge aquifères importants de São Paulo. Pour cette raison, l'utilisation intensive et fréquente de vinasse pourrait occasionner une pollution des eaux souterraines à long terme. Tenant compte de ces conditions particulières, la législation environnementale relative à l'utilisation de la vinasse a évolué. En 2005, le Secrétariat à l'Environnement de l'État de São Paulo a divulgué une norme technique sur les critères et les procédures pour l'application, la manipulation et la disposition de la vinasse en sol agricole [SMA (2005)]. Cette norme stipule principalement des mesures de protection des eaux de surface et souterraines, exigeant une imperméabilisation des réservoirs de stockage et des canaux de distribution du résidu, des locaux passibles d'application et la dose maximum de 185 kg de K₂O par hectare, calculée en fonction de la teneur de potassium présente dans la vinasse, limitant à 5% la capacité d'échange de cations du sol occupée par des ions de potassium [Bertoncini (2008)]. Cette législation est obligatoire dans l'État de São Paulo et, à l'exemple d'autres normes de nature environnementale, elle tend à être adoptée dans le reste du pays.

Indépendamment des résultats obtenus grâce à la ferti-irrigation, il subsiste un intérêt pour la mise à profit du contenu énergétique restant dans la vinasse, au moyen de sa biodigestion et de la production de biogaz. Une autre voie d'investigation est la concentration de la vinasse, par exemple, à travers la recirculation dans la fermentation, combinée avec la pré-concentration du jus, ou en utilisant des membranes, en vue de réduire son volume et de faciliter son transport à des distances plus grandes [CGEE (2005)]. Les deux alternatives n'ont pas encore atteint des indicateurs de viabilité économique motivants, comme on l'aura déjà observé au Chapitre 4, mais, avec l'évolution des processus, elles peuvent être adoptées à moyen terme, spécialement dans les contextes où la topographie et les distances rendent la ferti-irrigation plus difficile.

Comme indication importante de l'évolution de l'agro-industrie de la canne à sucre dans le traitement et la réduction de lancement de ses effluents liquides dans les corps hydriques, une étude de la Cetesb effectuée dans les 16 bassins hydrographiques de l'État São Paulo où il existe une production de bioéthanol, a estimé une décharge potentielle de 9.340 mille tonnes journalières de demande biochimique d'oxygène (DBO) associée aux usines de sucre et de bioéthanol. A cela il faut ajouter un lancement effectif de 100.000 tonnes, ce qui représente une diminution de 99% du potentiel polluant, évalué par la charge organique [Moreira (2007)]. Naturellement, ces résultats démonstratifs ont été encouragés par l'action de contrôle, mais ils indiquent qu'il existe des technologies disponibles et utilisées, capables d'atténuer de manière significative l'impact des effluents liquides sur les cours d'eau.

Malgré les résultats obtenus, en fonction de la magnitude de la superficie occupée et de la production de bioéthanol, des efforts permanents en vue de maintenir ou de réduire les impacts environnementaux de ces effluents se justifient. Dans ce sens, d'intéressantes mesures sont adoptées actuellement pour la protection des sources d'eau, en particulier avec l'abandon progressif de la culture de la canne dans les « Zones de Préservation Permanente (APP), environ 8% de la terre cultivée, ce qui rendra possible leur récupération de forme spontanée ou leur reconstitution à l'aide du reboisement, principalement dans les végéta-

tions en marge des sources et des rivières, avec des effets positifs importants sur la biodiversité [Ricci Jr. (2005a)].

Utilisation de produits phytosanitaires agricoles

Dans la production de la canne à sucre, on utilise régulièrement des produits chimiques tels que les insecticides, les fongicides, les herbicides et les agents de maturation ou de retardement de la floraison, à des niveaux qui peuvent être considérés bas en comparaison avec la moyenne observée sur d'autres cultures commerciales importantes.

Tableau 30 – Utilisation de produits phytosanitaires agricoles dans les principales cultures au Brésil
(En kg d'ingrédient actif par hectare)

| Produit | Année | Culture | | | | |
|---------------------------------|-------|---------|---------------|--------|------|------|
| | | Café | Canne à Sucre | Orange | Maïs | Soja |
| Fongicide | 1999 | 1,38 | 0,00 | 8,94 | 0,00 | 0,00 |
| | 2003 | 0,66 | 0,00 | 3,56 | 0,01 | 0,16 |
| Insecticide | 1999 | 0,91 | 0,06 | 1,06 | 0,12 | 0,39 |
| | 2003 | 0,26 | 0,12 | 0,72 | 0,18 | 0,46 |
| Acaricide | 1999 | 0,00 | 0,05 | 16,00 | 0,00 | 0,01 |
| | 2003 | 0,07 | 0,00 | 10,78 | 0,00 | 0,01 |
| Autres produits phytosanitaires | 1999 | 0,06 | 0,03 | 0,28 | 0,05 | 0,52 |
| | 2003 | 0,14 | 0,04 | 1,97 | 0,09 | 0,51 |

Source : Arrigoni et Almeida (2005) et Ricci Jr. (2005b).

Comme le montre le Tableau 30, les chiffres de la consommation de produits agrochimiques pour quelques-unes des principales cultures brésiliennes, d'après le Syndicat National de l'Industrie de Produits pour la Défense Agricole (Sindag), varie assez bien selon la culture. Dans le cas de la canne à sucre, la consommation de fongicides est pratiquement nulle et les insecticides sont utilisés en quantités proportionnellement moins élevées.

L'utilisation moins élevée de ces produits phytosanitaires découle des stratégies de lutte contre les maladies, principalement au moyen de la sélection de variétés résistantes, de programmes d'amélioration génétique, et surtout, au moyen de l'adoption, avec d'excellents résultats, de méthodes de contrôle des principaux ravageurs de la canne, la chenille mineuse de la canne à sucre (*Diatraea saccharalis*), espèce de papillon combattu à l'aide de la guêpe *Cotesia flavipes*, et la cigale des racines de la canne à sucre (*Mahanarva fimbriolata*), contrôlées à l'aide d'application du champignon *Metarhizium anisopliae* [Arrigoni et Almeida (2005)].



Larve de la chenille mineuse de la canne à sucre (*Diatraea saccharalis*) et son parasitoïde, la guêpe *Cotesia flavipes* [Bento (2006)].

Le contrôle biologique emploie des parasitoïdes ou des prédateurs pour contrôler des ravageurs des cultures, avec une spécificité élevée et un très faible impact environnemental. Cette méthode offre des avantages économiques par rapport à l'utilisation d'insecticides conventionnels, car elle n'opère pas d'application indiscriminée de produits chimiques, et elle maintient les ravageurs à un niveau minimum tolérable. La limitation du brûlage de la canne doit augmenter la nécessité de l'utilisation de ce type de contrôle sur la petite cigale.

En ce qui concerne la lutte contre les mauvaises herbes, la canne utilise encore d'avantage d'herbicides que le café mais moins que la citriculture et autant que le soja. Cependant, avec l'adoption progressive de la récolte de la canne sans brûlis, la partie de la paille qui reste sous le sol supprime la germination des mauvaises herbes envahissantes, conduisant ainsi à une consommation significativement plus faible d'herbicides [Urquiaga et al. (1991)]. En ce qui concerne l'utilisation de produits agrochimiques, il est important de mentionner que la Loi 7.802/89 détermine l'utilisation de la prescription agronomique, en définissant les responsabilités et les procédures d'application et d'élimination des récipients.

Emploi de fertilisants

Comme le recyclage d'éléments nutritifs est une des ses caractéristiques importantes, la culture de la canne au Brésil consomme une quantité relativement faible de fertilisants conventionnels. En effet, la ferti-irrigation au moyen de la vinasse a réduit assez bien la nécessité d'apport de potassium, et son complément avec les eaux du processus industriel et les cendres des chaudières a augmenté de manière significative l'offre d'éléments nutritifs pour

les plantations de canne à sucre, avec des bénéfices économiques et environnementaux. Si nous considérons le cycle productif typique d'une plantation de canne à sucre (canne vierge et quatre repousses), dans les conditions moyennes du Brésil, l'application de la vinasse et du tourteau de filtration, bien qu'elle ne produise pas d'effet important sur l'offre d'azote, permet de réduire la demande de phosphore (P_2O_5) de 220 kg/ha à 50 kg/ha et de potassium (P_2O) de 170 kg/ha à 80 kg/ha, en maintenant des niveaux similaires de productivité [CGEE (2005)]. À ce propos, les parties de la canne qui nous intéressent pour la production de bioéthanol sont seulement les sucres et la fibre, constitués de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Dans la mesure du possible, tous les autres éléments nutritifs retirés de la canne doivent retourner au sol.

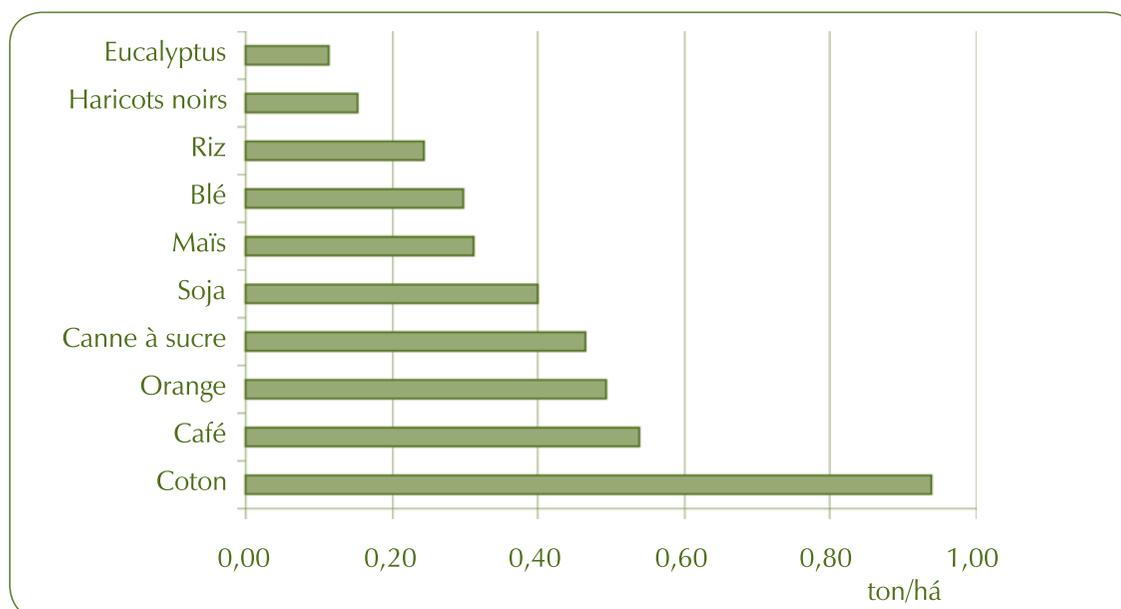
En outre (et ceci est particulièrement intéressant), il a été observé dans les plantations de canne à sucre une disponibilité d'azote bien supérieure aux apports éventuels des fertilisants, signe de l'existence de mécanismes de fixation biologique de l'azote (FBN) par des colonies de bactéries du genre *Azospirillum*, micro-organismes diazotrophiques (capables de convertir l'azote atmosphérique en des formes assimilables par d'autres organismes), vivant librement dans la région des rhizomes ou associés aux graminées telles que la canne. Des études pionnières dans ce domaine ont été élaborées ces dernières décennies par Johanna Döbereiner, grande scientifique brésilienne et chercheuse de l'Embrapa, et peuvent ouvrir des perspectives d'augmentations significatives de productivité pour l'agro-industrie de la canne à sucre [CNPAB (2008)].

Si l'on prend en considération les cultures avec des superficies plantées supérieures à un million d'hectares, la canne à sucre se situe actuellement en quatrième place pour la consommation d'engrais chimiques au Brésil, comme le montre le Graphique 24, préparé sur base de données de l'Association Nationale de Diffusion d'Engrais (Anda) et sur les relevés de l'IBGE. Ce niveau de consommation de fertilisants de la canne peut être considéré relativement bas, si on le compare avec celui d'autres pays. Sur la base des chiffres du CTC concernant la fertilisation de la canne vierge et de la repousse dans la Région Centre-Sud, qui recommande l'application de, respectivement, 290 kg et 260 kg d'une formule moyenne de $N-P_2O_5-K_2O$, on montre que les niveaux de fertilisation adoptés pour la canne en Australie sont de 30% et 54% supérieurs à ceux adoptés au Brésil [Donzelli (2005a)].

La fertilisation complémentaire aux sous-produits recyclés est importante pour assurer la production des plantations de canne à sucre dans les conditions actuelles, et sans elle, les niveaux de productivité chuteraient de manière significative. Cependant, la consommation de fertilisants représente une part importante des coûts agricoles, ce qui justifie l'adoption croissante de nouvelles technologies pour tenter de diminuer la demande d'engrais et de calcaire, en rendant son utilisation rationnelle. Dans ce sens, on peut citer des formes innovatrices de distribution de fertilisants avec une réduction des pertes par volatilisation et une augmentation de matière organique avec la récolte de la canne à sucre sans brûlis [Gaval et al. (2005)], ainsi que l'agriculture de précision qui présente un grand potentiel. Grâce à l'emploi de cartes de productivité, avec les caractéristiques physiques et chimiques du sol

(granulométrie, niveaux de macronutriments et micronutriments, acidité, densité et résistance à la pénétration), des économies significatives de fertilisants peuvent être obtenues en substituant l'application uniforme d'engrais par une application à des taux variés, en suivant les informations détaillées du sol. L'application de l'agriculture de précision à l'Usine Jales Machado, à Goianésia (GO), a révélé une réduction de 34,5% de l'application de calcaire et de 38,6% pour l'application de phosphore, ce qui représente une économie de 36% du coût correspondant à ces produits par hectare fertilisé, tout en maintenant la productivité [Soares (2006)]. Des études expérimentales dans la région de Araras, à São Paulo, ont montré que l'on peut s'attendre à des réductions de 50% de la consommation de fertilisants phosphatés et potassiques, en adoptant des taux variables d'application [Cerri (2005)] et l'on estime qu'actuellement, environ 10% des plantations de canne au Brésil utilisent déjà une forme d'agriculture de précision pour l'application de phosphore et du calcaire selon des taux variés (Molin, 2008).

Graphique 24 – Consommation de fertilisants pour les principales cultures au Brésil



Source : Donzelli (2005a).

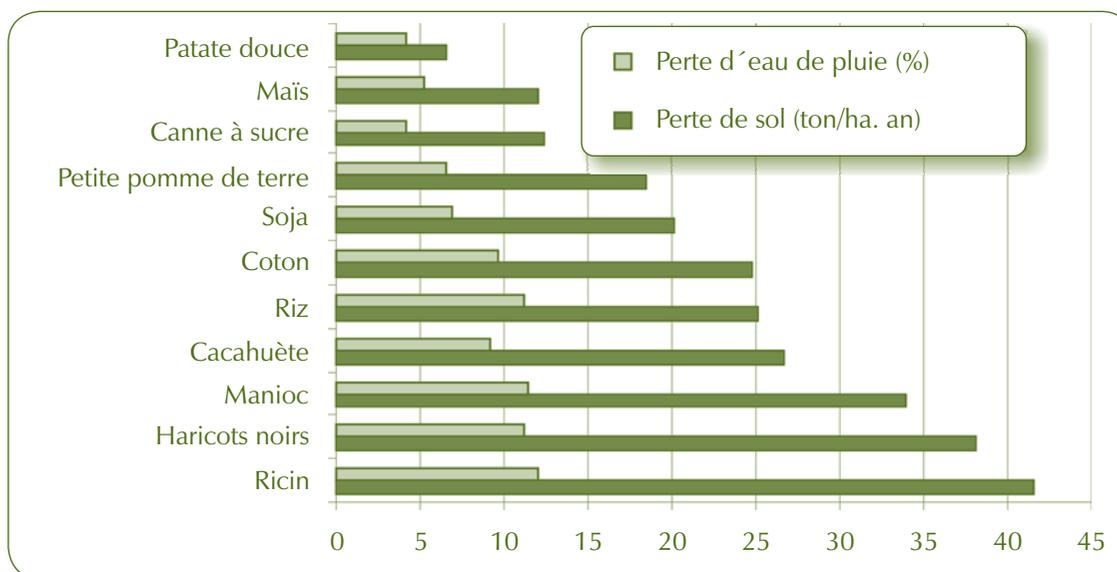
En résumé, l'utilisation de fertilisants, de grande importance pour la productivité des plantations de canne à sucre au Brésil, a été pratiquée à des taux réduits par le recyclage d'éléments nutritifs du processus industriel, et l'apport de fertilisants conventionnels tend à diminuer avec l'introduction progressive des nouvelles technologies disponibles pour la fertilisation.

Érosion et protection du sol

Provoqué fréquemment par des pratiques agricoles inadéquates, le processus d'érosion est la principale cause de la dégradation des terres agricoles et s'associe, souvent, à la perte irréversible du sol cultivable. Pour cette raison, l'utilisation productive des terres doit tenir compte du type de sol (texture, types d'horizon diagnostiqué, taux d'infiltration d'eau), de la pente, du régime de pluies et de la culture à mettre en place, et établir les espaces, les routes et les lignes de culture, afin de protéger la couche fertile du sol. Comme la culture de la canne à sucre est pratiquée depuis des siècles au Brésil (dans de nombreux cas, dans la même région), il existe des informations suffisantes à propos de son impact sur la conservation du sol [Donzelli (2005b)].

Plante semi-pérenne, caractéristique qui réduit le nombre d'opérations agricoles responsables de l'exposition du sol aux intempéries et facilitant la perte de sa couche fertile, la canne à sucre est, de l'avis de tous, une culture conservatrice, comme on peut l'observer au Graphique 25, qui fournit des données de perte superficielle de sol par an et de perte d'eau de pluie pour différentes cultures pratiquées au Brésil. Par exemple, la perte de sol qui se produit dans les plantations de canne à sucre est d'environ 62% de la valeur observée pour le soja. Du point de vue de la capacité de retenir l'eau de pluie, aspect important pour la production agricole et pour la protection du sol, la canne se révèle une des cultures les plus efficaces, comme le montre également le Graphique 25.

Graphique 25 – Pertes de sol et d'eau de pluie dans certaines cultures au Brésil



Source : Donzelli (2005b).

L'utilisation croissante de la récolte de la canne sans brûlis (commentée aux paragraphes précédents) où la paille protège le sol contre l'impact direct des gouttes de pluie et réduit la préparation du sol, devra, au cours des années à venir, améliorer d'avantage encore le niveau de conservation des sols cultivés avec la canne à sucre, représentant une réduction d'environ 50% des pertes de sol et d'eau de pluie observées [(Donzelli (2005b)].

Biodiversité

La production efficiente de bioéthanol de canne à sucre impose inévitablement, une plantation importante de canne à sucre, monoculture dont l'impact environnemental dépend des caractéristiques originales du terrain occupé et de l'adoption de pratiques qui préservent l'environnement. Ainsi, en ce qui concerne la menace contre la biodiversité préexistante, les effets de la plantation de canne à sucre sur des terrains occupés antérieurement par d'autres cultures (ou par un élevage extensif), sont à distinguer de ceux produits par une plantation sur des espaces naturels, spécialement ceux à caractère forestier. Dans le premier cas, il s'agit d'une substitution d'utilisation du sol, tandis que dans le second cas, il s'agit d'une occupation nouvelle qui peut engendrer des impacts négatifs importants.

La législation brésilienne (en particulier le Code Forestier Brésilien, Loi 4.771, de 1965, et la Loi 7.803, de 1989) stipule que, dans les propriétés agricoles, on préserve une Réserve Légale (RL) – zone située à l'intérieur d'une propriété ou d'une possession rurale, excepté celle de préservation permanente, nécessaire pour l'utilisation durable des ressources naturelles, pour la conservation et la réhabilitation des processus écologiques, pour la conservation de la biodiversité et pour l'abri et la protection de la faune et de la flore native – avec au minimum 20% de la superficie totale, selon la région (en Amazonie, il s'agit de 80%). La législation détermine également que l'on conserve, avec leur végétation originale, les Zones de Préservation Permanente (APP) – les terres au sommet des collines, les flancs et les marges des cours d'eau.

Malheureusement, l'expansion des frontières agricoles durant les dernières décennies, de manière générale, a ignoré ces dispositions. Actuellement, en raison d'une plus grande prise de conscience de l'environnement, du renforcement de l'appareil institutionnel dans ce domaine, et de la disponibilité de systèmes de surveillance avec images de satellite, comme le montre la Figure 26, ces déterminations légales sont contrôlées par les entités gouvernementales à divers niveaux, et ont été incorporées effectivement dans la pratique agricole de plusieurs usines, aussi bien celles qui existaient déjà antérieurement que celles qui se trouvent en phase d'implantation. Pour illustrer le premier cas, dans de nombreuses usines de l'État de São Paulo, on a observé durant la dernière décennie une réduction de la plantation de canne dans les zones en marge des cours d'eau (zones riveraines) et la reconstitution forestière autour des sources, de sorte que, même avec l'expansion significative des activités agricoles, on perçoit une augmentation marginale de la couverture forestière dans l'état, estimée à 3,5 millions d'hectares [Institut Forestier (2004)]. Dans les nouvelles unités, spécialement dans les zones de végétation dense, le souci d'agir de manière correcte envers l'environnement

est évident chez de nombreuses entreprises, qui cherchent depuis le début de leurs activités, à respecter la législation relative aux Zones de Préservation Permanente et aux Réserves Légales, motivées par la réduction des risques légaux et par les gains d'image associés à une attitude responsable au niveau de l'environnement.

Figure 26 – Exemple d'image de satellite utilisée dans la surveillance de la couverture végétale



Source : CTC (2008).

Bien que la culture de la canne soit moins agressive que d'autres cultures et bien qu'elle emploie largement des techniques comme le recyclage des sous-produits et le contrôle biologique des ravageurs, il est essentiel que l'agro-industrie du bioéthanol, qui se développe fortement, respecte de manière stricte la législation de l'environnement et soit dûment pénalisée en cas d'écarts éventuels. L'expérience courante dans beaucoup d'usines brésiliennes, avec de bons résultats dans le rapport agro-industrie/environnement (disponibilité actuelle de technologies agricoles et d'industries à faible impact sur l'environnement), confirment la possibilité de produire du bioéthanol de canne à sucre de forme rationnelle, puisque l'adoption de pratiques environnementales axées sur la conservation se révèle intéressante au niveau de l'économie [Smeets et al. (2006)].

Cependant, il est très important d'observer que l'application effective de la législation et la diffusion d'une attitude plus favorable à l'environnement naturel, sous tous les aspects déjà commentés, comme la biodiversité, les ressources hydriques et le sol, découlent, par dessus tout, de la présence claire et active de l'État, mettant en oeuvre et contrôlant l'application de la législation environnementale. Ceci est corroboré par une conscience de l'environnement

plus éveillée qui se manifeste par l'intermédiaire d'entités publiques et privées, prenant une position claire en faveur du développement responsable de la bioénergie dans le pays, chaque fois qu'elle apparaît comme une des rares alternatives capables effectivement d'altérer le *status quo* énergétique global préoccupant [FBDS (2005)].

Autres aspects environnementaux

Récemment, deux nouvelles questions environnementales relatives à la production de bioéthanol de canne à sucre ont été présentées : l'émission de gaz à effet de serre associée au changement du modèle d'utilisation du sol, avec la perte de sa couverture végétale lors de la mise en place des plantations de cannes à sucre, et le processus indirect de déboisement causé par l'occupation des terres de pâturages par la canne, qui provoque le transfert des troupeaux vers les frontières de l'agro-élevage, où seraient formées de nouvelles zones d'élevage. Ce sont bien sûr des thèmes complexes, encore en discussion mais on peut déjà avancer, en ce qui les concerne, quelques informations importantes.

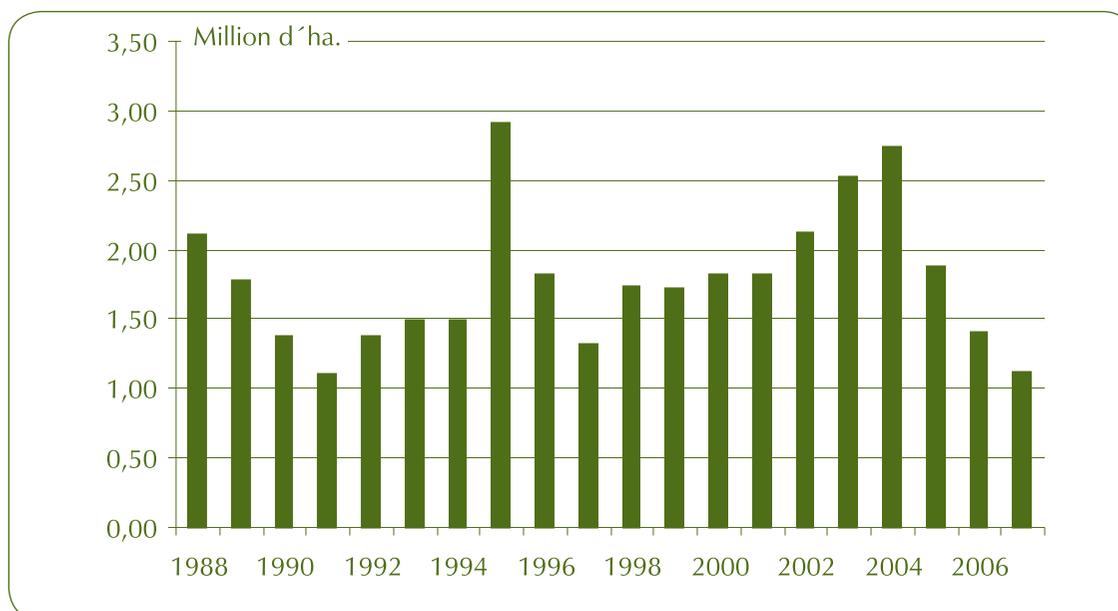
L'impact du changement de l'utilisation de la terre déterminé par la production de matière première pour biocarburants sur les émissions de gaz à effet de serre, a été abordé dans quelques études. Selon le type de végétation antérieure dans la zone utilisée pour la production de biocarburant, la perturbation provoquée par le changement d'utilisation du sol pourrait libérer dans l'atmosphère une quantité de carbone « emprisonnée » auparavant dans la végétation et dans le sol, suffisamment élevée pour mettre en jeu son bénéfice environnemental. Cependant, il existe encore une grande incertitude quant à la magnitude de cet effet, car les teneurs de carbone dans le sol en des conditions d'équilibre dépendent, entre autres facteurs, de la culture, du type de sol, des caractéristiques du climat local. Les taux de libération et l'accumulation de carbone, postérieurs à la plantation régulière de la canne à sucre, dépendent également de nombreux facteurs. Les évaluations de ce type d'impact présentent le bioéthanol produit à base de canne à sucre dans les terrains à végétation dense du Brésil, comme une alternative de moindre impact parmi les biocarburants étudiés [Fargione (2008)], mais ce sont là des résultats préliminaires. C'est une question qui mérite une attention particulière et d'avantage d'études sont encore nécessaires pour estimer de manière consistante la part réelle de ces émissions dans le cycle de vie des biocarburants.

En outre, dans le cas du bioéthanol au Brésil, il est peu probable que l'on puisse associer des pertes de couverture forestière à la production de bioéthanol, puisque l'expansion des plantations de canne à sucre s'est produite en premier lieu dans des zones occupées précédemment par des pâturages de basse productivité ou des cultures annuelles destinées en grande partie à l'exportation, comme le soja. Dans ce cas, le système racinaire et la biomasse sur le sol sont, en général, de moindre magnitude que dans le cas de la canne. Un autre aspect dont il faut tenir compte est l'effet de l'augmentation de la récolte de canne sans brûlis, dans laquelle une plus grande quantité de paille, et donc de carbone, est incorporée au sol [Macedo (2008)].

L'autre question concernant le déboisement induit indirectement par l'expansion de la culture de la canne à sucre, comporte un argument difficile à soutenir, car il existe peu d'indices de cette causalité, qui mérite cependant d'être commentée. Les forêts tropicales sur toute la planète subissent une énorme pression en raison de l'utilisation, rationnelle ou non, de leurs ressources en bois et de la possibilité d'ouvrir l'espace à de nouveaux fronts d'occupation d'agro-élevage. Au Brésil, pays doté de grandes étendues couvertes de forêts primaires, le processus de déboisement est séculaire et obtenir sa réduction effective est encore un des principaux défis pour les efforts croissants du gouvernement en vue d'ordonner le processus d'occupation de l'Amazonie, grâce à la définition de zones de protection, l'augmentation du contrôle, la coordination de l'activité de divers organismes et l'utilisation de technologie moderne (comme la surveillance à distance).

La perte de couverture forestière en Amazonie brésilienne a atteint une moyenne annuelle de 1,8 million d'hectares entre 2000 et 2006 et a diminué dernièrement, comme le montre le Graphique 26 pour l'Amazonie Légale, sur base des résultats du suivi par images de satellites, bien que ce n'est qu'au cours des prochaines années qu'il sera possible de confirmer si les taux de déboisement ont été réellement freinés [Inpe (2008)]. On estime que près de 7% de la couverture originale de la forêt amazonienne a disparu, principalement pour l'exploitation du bois, la production de charbon végétal pour la sidérurgie, ce qui a entraîné l'apparition de terrains occupés par des systèmes extensifs d'élevage de cheptel bovin pour l'abattage, et les plantations de soja [ISA (2008)].

Graphique 26 – Déboisement annuel en Amazonie brésilienne



Source : Inpe (2008).

La zone déboisée en Amazonie brésilienne durant la dernière décennie (1998–2007) est de 19 millions d'hectares, une superficie plus de dix fois supérieure à l'expansion observée des plantations de canne pour la production de bioéthanol durant la même période. La production de bioéthanol n'implique pas le déboisement, dont la problématique complexe impose l'ordonnancement de l'expansion des activités agricoles et d'élevage, dans la région amazonienne, et le renforcement des mesures de contrôle et d'exécution légale. Le Brésil, ainsi que divers autres pays situés dans la région tropicale humide de la planète, possède des terres disponibles pour une expansion significative de la production agricole, et peut produire de façon durable des ressources alimentaires et bioénergétiques, sans devoir abandonner son patrimoine forestier, comme on en discutera avec plus de détails dans le prochain paragraphe.

7.2 Utilisation du sol

Un thème récurrent dans la discussion des perspectives pour le bioéthanol est la question de l'utilisation des terres agricoles, par rapport à leur disponibilité et à l'éventuel impact sur la disponibilité en produits alimentaires. Ce paragraphe analyse ces aspects du point de vue de la production du bioéthanol de canne à sucre au Brésil, en évaluant l'évolution de l'utilisation des terres agricoles au cours des dernières décennies. En outre, on présente les perspectives de la division en zones agro-écologiques et on termine par une vision du potentiel estimé pour l'expansion de la culture de la canne à sucre dans le pays.

Au chapitre suivant, on analysera les liens importants entre la production bioénergétique et la sécurité alimentaire, sous une perspective globale, en prenant en considération non seulement le Brésil, et en y incluant d'autres combustibles.

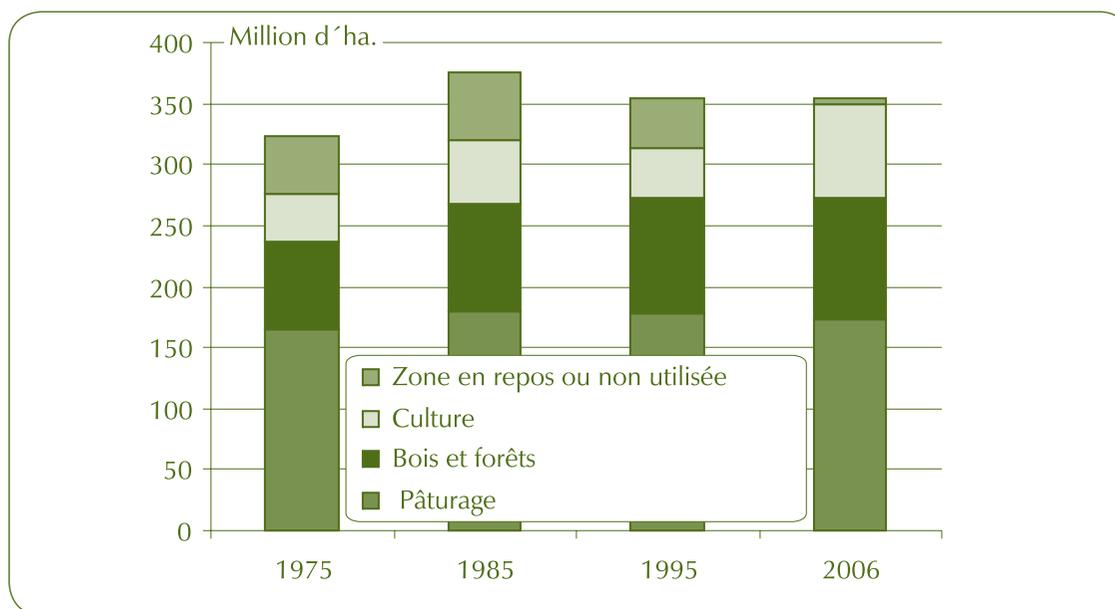
Evolution de l'utilisation de terres agricoles au Brésil

Le Brésil possède une superficie totale de 851,4 millions d'hectares, couverte en grande partie par des forêts tropicales. Sur la base des résultats du Recensement de l'Agriculture et de l'Élevage de 2006, l'extension des propriétés rurales brésiliennes – qui exclut les zones protégées, les cours d'eau et les aires ne convenant pas à l'agriculture, et inclut les réserves légales de formations naturelles – totalise 354,8 millions d'hectares (42% de la superficie totale du pays), consacrés aux pâturages naturels et plantés, à la sylviculture, aux forêts primaires et aux cultures pérennes et annuelles. L'évolution des divers types d'utilisation du sol ces 30 dernières années peut être observée au Graphique 27, dans lequel se distinguent la variation relativement faible de la superficie totale des propriétés et l'expansion significative des terres cultivées au cours de la dernière décennie.

Entre 1995 et 2006, l'agriculture brésilienne a connu une croissance de 83,5% et occupe désormais 76,7 millions d'hectares, environ 9% de la superficie du pays. Une telle croissance a été obtenue essentiellement par l'occupation de terres non utilisées ou en repos et dans

une moindre mesure, par l'occupation des pâturages, qui ont été réduits de 5,4 millions d'hectares, et représentent maintenant environ 20% du territoire brésilien. Ce processus de croissance de l'agriculture dans la zone des pâturages s'est produit de façon systématique depuis les années 1970, de sorte que le rapport entre la surface de pâturages et celle des cultures est passé de 4,5, en 1970 à 2,2, en 2006.

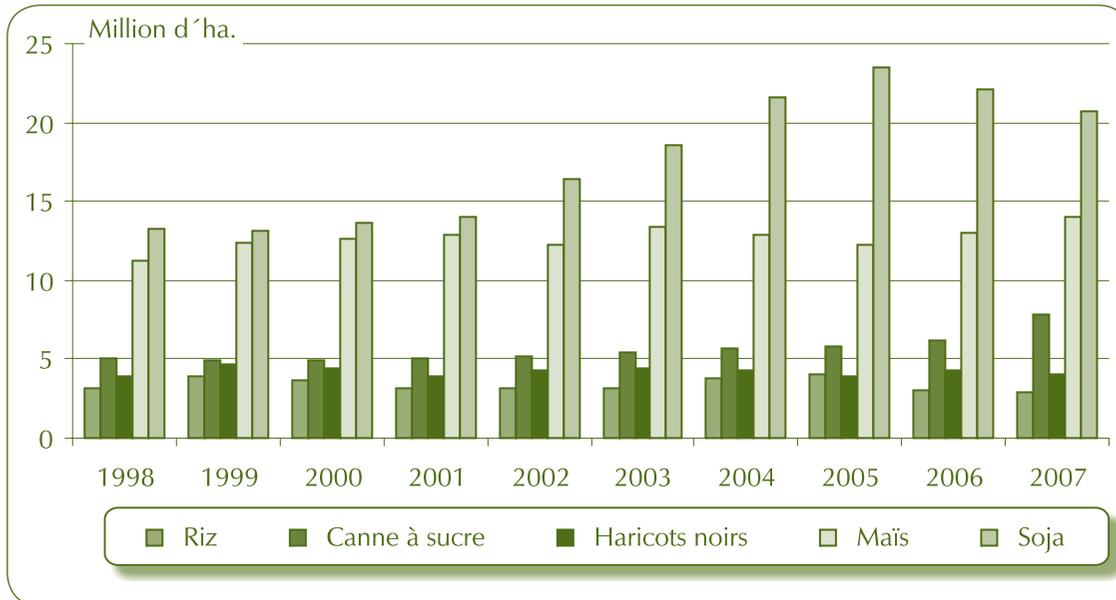
Graphique 27 – Utilisation de la terre dans les propriétés rurales au Brésil



Source : IBGE (2007).

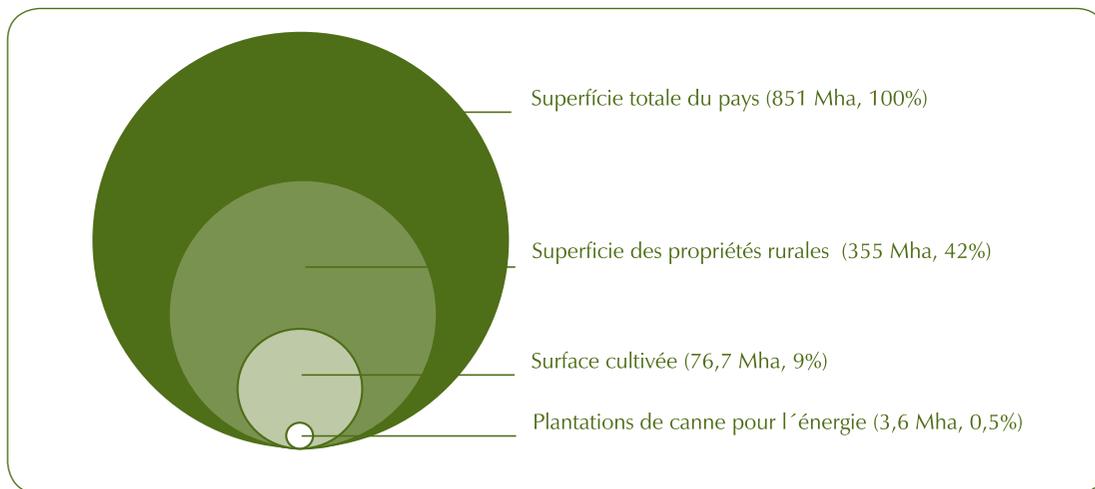
En 2007, la culture de la canne au Brésil occupe 7,8 millions d'hectares, environ un tiers de la superficie occupée par le soja, et la moitié de la superficie des cultures de maïs, comme le montre le Graphique 28. Approximativement la moitié de la canne produite se destine à la fabrication de bioéthanol. Ainsi, les plantations de canne à sucre destinées à la production de combustibles au Brésil correspondent à 5% de la superficie cultivée, 1% de la superficie des propriétés agricoles, 2,3% des superficies destinées aux pâturages et 0,5% de la superficie du pays. Fort de ces chiffres, elles contribuent aussi bien à l'extension territoriale du pays qu'au bon rendement de la canne dans le captage d'énergie solaire, car n'importe quelle autre matière première, avec les technologies actuelles, demanderait une étendue plus grande de surfaces cultivées. Une représentation de l'importance relative de la superficie consacrée à la canne à sucre à des fins énergétiques, comparée aux superficies totales et agricoles du pays, est donnée à la figure 29.

Graphique 28 – Evolution de la superficie utilisée par les principales cultures au Brésil



Source : IBGE (2007).

Graphique 29 – Utilisation des terres au Brésil



Source : IBGE (2007).

La croissance significative de la superficie plantée de canne observée dans le Centre-Ouest, entre 1998 et 2007, confirme la tendance de l'agro-industrie de s'étendre dans les régions

proches des zones productrices traditionnelles présentant une topographie et des conditions édaphoclimatiques adéquates. Bien qu'il faille encore résoudre les carences d'infrastructure, spécialement de transport, cette région est en voie de constituer un nouvel axe important pour l'agro-industrie de la canne à sucre au Brésil. Dans cette région, l'expansion de la canne à sucre s'est produite, essentiellement, par la substitution de pâturages et, éventuellement, de champs de soja, qui avaient substitué les régions à la végétation dense naturelle il y a quelques décennies.

Zonage agroécologique

Dans le but d'organiser et d'optimiser l'expansion de l'agro-industrie de la canne au Brésil, un Zonage Agroécologique de la Canne à Sucre (ZAE-Canne) a été développé en 2008, sous la coordination du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de l'Approvisionnement (MAPA), dont les premiers résultats devront être disponibles cette année encore. Il s'agit d'une étude d'envergure, conduite par l'Embrapa Sols et impliquant des dizaines d'institutions et de chercheurs, dont le but est de définir, à titre indicatif, les zones aptes et les régions pour lesquelles on ne recommande pas cette culture sur une grande échelle. Le zonage doit être utilisé comme instrument pour l'orientation des politiques de financement, d'investissements en infrastructure et de perfectionnement du niveau fiscal. Il peut servir également à d'éventuelles certifications socio-environnementales qui pourraient être établies à l'avenir [Strapasson (2008)].

En ce qui concerne les zones agricoles et d'élevage dans lesquelles la canne n'est pas encore cultivée, mais qui offrent un potentiel apparent, le zonage agroécologique croise les informations des cartes du sol, du climat, des zones de préservation environnementale, géomorphologiques et topographiques. Il identifie également l'utilisation de la terre actuelle, il examine la législation environnementale fédérale et de l'état et les données agronomiques de la canne à sucre, comme les températures idéales pour sa croissance, les types de sol où elle s'adapte le mieux, les nécessités hydriques, etc. Pour cela, on définit et on classe les zones dotées d'un potentiel plus important, où on peut planter la canne, et les zones où cette culture n'est pas possible ou non recommandée. Comme condition, il a été établi un palier minimum de productivité, déterminé par la moyenne nationale de 70 tonnes par hectare de canne.

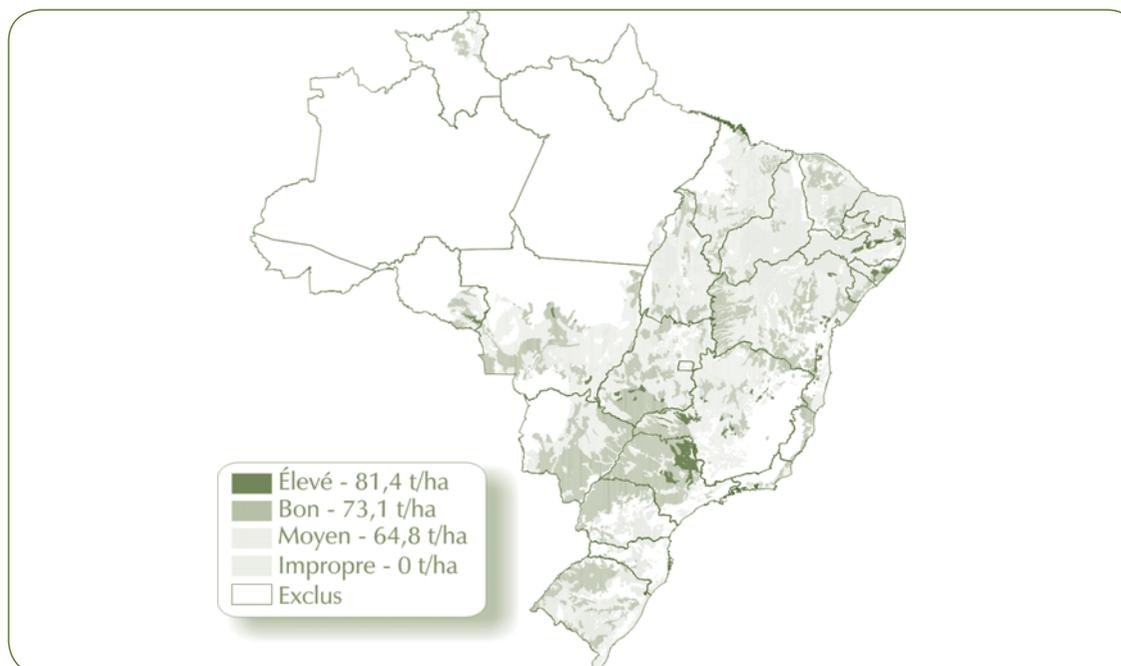
Potentiel d'expansion de la culture de la canne à sucre au Brésil

Moins détaillée que le zonage agroécologique (en cours de développement par le Mapa), mais avec un objectif similaire d'examiner de manière prospective les possibilités et les impacts de la production de grandes quantités de bioéthanol en vue d'une substitution partielle de l'essence à l'échelle globale, l'étude développée par le Centre de Gestion et d'études stratégiques (CGEE) avec le Noyau Interdisciplinaire de Planification Énergétique (Nipe) de l'Université de Campinas, a réalisé un relevé des zones ayant un potentiel pour la production de canne, à l'aide de cartes des sols et de cartes climatiques. Ces cartes prennent en considération les disponibilités hydriques et les déclivités des terrains (moins de 12°, pour faciliter la

récolte mécanisée), les zones protégées ou de préservation, comme le « Pantanal » et la Forêt Amazonienne, et les zones de réserves forestières et indigènes [CGEE (2005)]. Les résultats de cette étude sont illustrés par les Figures 27 et 28 avec les zones classées selon leur aptitude à la culture de la canne, respectivement sans irrigation et en tenant compte de l'irrigation de secours, dénommée ainsi du fait qu'elle n'est utilisée que dans les plantations de canne à sucre en croissance, où l'augmentation de la production est un objectif secondaire, et où on applique des couches d'eau inférieures à 200 mm, dans les périodes de déficit hydrique plus critique (l'équivalent d'un apport en eau de moins de 2.000 m³/ha.an).

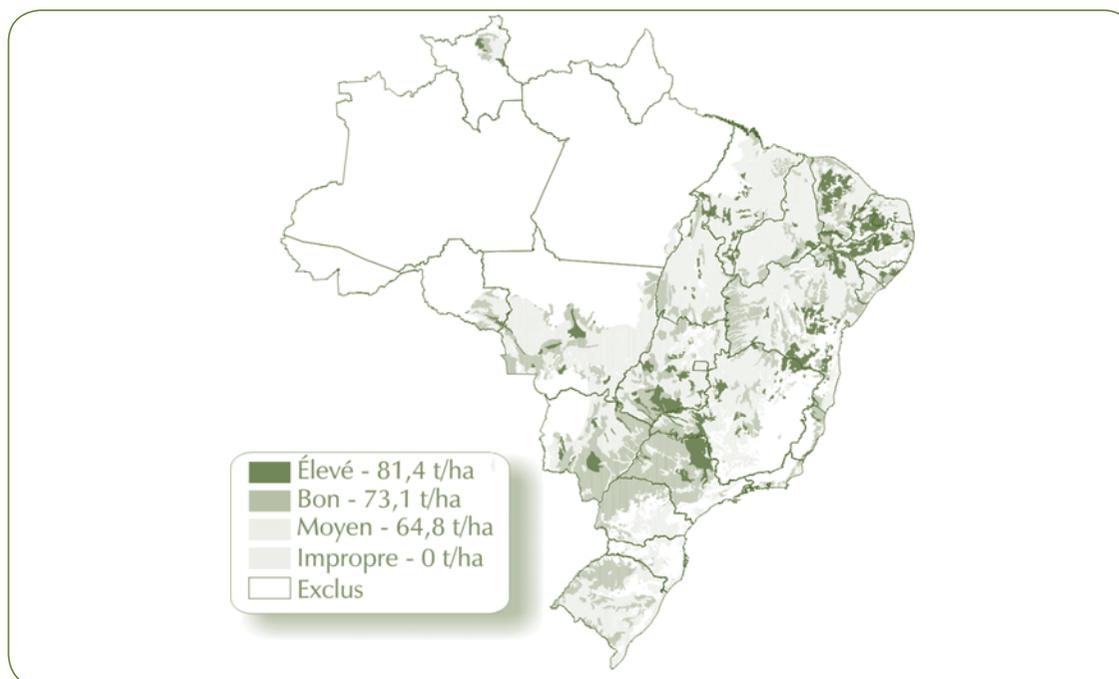
Dans la carte de potentiel pour la plantation de canne sans irrigation (Figure 27), il est possible d'indiquer qu'une grande partie des régions comportant des zones au potentiel élevé et moyen, équivalentes à 121,8 millions d'hectares (33,7% du total), sont situées dans le Centre-Sud du Brésil. Ces régions, sans restrictions importantes de sols ou de climat, offrent un relief plat ou légèrement ondulé. D'autre part, quand on considère l'utilisation de l'irrigation de sauvetage, sur la carte présentée à la Figure 28, les zones au potentiel élevé et moyen passent à 135,9 millions d'hectares (37,6% du total), et on perçoit, dans ce cas, un changement significatif du potentiel de production de la région semi-aride du nord-est [CGEE (2005)].

Figure 27 – Potentiel pour la culture de la canne sans irrigation



Source : CGEE (2005).

Figure 28 – Potentiel pour la culture de la canne avec irrigation de secours



Source : CGEE (2005).

Une synthèse de ces résultats est présentée au Tableau 31. Soulignons que, dans cette classification de productivité attendue, la valeur définie de 65 t/ha pour un faible potentiel est la moyenne mondiale de productivité de la culture de la canne, et pour cette raison, on peut également prendre en compte pour des fins d'expansion de cette culture, une superficie supplémentaire de 167,5 Mha (46,4 %) du total.

Tableau 31 – Potentiel pour la production de canne à sucre au Brésil

| Potentiel | Productivité attendue (t/ha) | Superficie avec un potentiel d'utilisation | | | |
|-----------|------------------------------|--|-------|-----------------|-------|
| | | Sans irrigation | | Avec irrigation | |
| | | Million d'ha | % | Million d'ha | % |
| Élevé | > 80 | 7,90 | 2,2 | 37,92 | 10,5 |
| Moyen | >73 | 113,90 | 31,5 | 98,02 | 27,1 |
| Bas | > 65 | 149,22 | 41,3 | 167,65 | 46,4 |
| Impropre | < 65 | 90,60 | 25,1 | 58,00 | 16,0 |
| Total | – | 361,62 | 100,0 | 361,59 | 100,0 |

Source : CGEE (2005).

Ainsi, l'expansion de l'agro-industrie du bioéthanol, dans des scénarios de croissance significative, basée sur des conditions de respect des zones protégées et assurant une productivité suffisante, ne rencontre pas, dans le cas brésilien, de restrictions significatives en terme de disponibilité de terres. Dans cette logique, les estimations présentées ci-après aident à renforcer l'argument développé ci-dessus.

A titre d'exemple des potentialités existantes, en considérant les chiffres globaux de la récolte 2007/2008, le Brésil a produit environ 22 milliards de litres de bioéthanol sur 3,6 millions d'hectares. Sur la base de cette donnée empirique et afin de promouvoir dans les conditions actuelles l'addition de 10% d'alcool anhydre à toute l'essence consommée dans le monde (1,3 milliard de mètres cubes), il faudrait 136,5 milliards de litres de bioéthanol, dont la production, dans les conditions brésiliennes, demanderait 23 millions d'hectares, superficie équivalente à celle occupée actuellement par le soja dans le pays. Sous des conditions similaires de productivité et d'efficacité énergétique, cette production pourrait être distribuée à diverses régions tropicales humides de la planète situées en Amérique Latine et dans les Caraïbes, en Afrique et en Asie, où l'on pratique traditionnellement la culture de la canne à sucre, comme commenté au Chapitre 3 et illustré par la Figure 29. La production de biocarburants à base d'autres matières premières ou d'autres formules technologiques quelconques actuellement disponibles exigerait des superficies cultivées bien supérieures.

Figure 29 – Zones de culture de canne à sucre



Source : Adapté de Tetti (2005).

Dans une vision prospective et sur la base de scénarios considérant la production en *clusters* (groupage d'unités de production d'éthanol), l'existence d'une logistique suffisante et les nécessités de terres pour d'autres cultures agricoles permanentes et temporaires à l'horizon de 2025, l'étude du CGEE indique une disponibilité effective de 80 millions d'hectares de

terres pour l'expansion de la culture de la canne à sucre au Brésil. En termes de demande, cette même étude a estimé à 205 milliards de litres le volume de bioéthanol nécessaire pour substituer 10% de la consommation mondiale d'essence projetée pour 2025. Supposant deux niveaux de mélange de bioéthanol dans l'essence consommée globalement (5% et 10%) et deux scénarios technologiques (l'actuel et l'amélioré), on a estimé les exigences de superficie pour approvisionner les marchés brésilien et global de sucre et de bioéthanol, en tenant compte encore du fait que 20% de la superficie doit être conservée comme réserve environnementale, avec les résultats résumés dans le Tableau 32 [CGEE (2005)].

Tableau 32 – Demande de superficies pour la production de bioéthanol visant le marché global en 2025

| Scénario | Consommation globale d'éthanol (Mm ³ /an) | Technologie | Cultures de canne (Mha) pour : | | | | Superficie totale requise | Utilisation de la terre disponible |
|----------|--|-------------|--|--------------------------|-------------|----|---------------------------|------------------------------------|
| | | | Production de sucre : interne et exportation | Production de bioéthanol | | | | |
| | | | | Marché interne | Exportation | | | |
| E5 | 102,5 | Actuelle | 4,5 | 8,5 | 19,0 | 32 | 40 | |
| | | Améliorée | 4,0 | 6,0 | 15,0 | 25 | 31 | |
| E10 | 205,0 | Actuelle | 4,5 | 8,5 | 38,0 | 51 | 64 | |
| | | Améliorée | 4,0 | 6,0 | 30,0 | 40 | 50 | |

Source : CGEE (2005).

Les gains de productivité dans l'agro-industrie de la canne à sucre, dont l'obtention doit être poursuivie, et l'introduction de technologies innovatrices pour la production de bio-carburant, pourront réduire la superficie requise dans les cultures énergétiques, dans une proportion importante. Dans le Tableau 32, la dernière ligne présente les superficies requises pour répondre en 2025 à la demande interne et associée à l'exportation de sucre (4 Mha), compte tenu de l'évolution de la technologie, et aussi pour produire suffisamment de bioéthanol pour approvisionner le marché interne (6 Mha) et promouvoir le mélange de 10% de bioéthanol dans la consommation globale d'essence (30 Mha, avec une nécessité totale 40 Mha), incluant la superficie à réserver pour la protection de l'environnement (8 Mha). Cette superficie représente la moitié des superficies disponibles au Brésil pour la production bio-énergétique, montrant qu'effectivement, la disponibilité de terres en conditions adéquates ne paraît pas être un élément limitateur pour la promotion rationnelle de la production de bioéthanol pour la consommation interne et l'exportation dans les régions de production [CGEE (2005)].

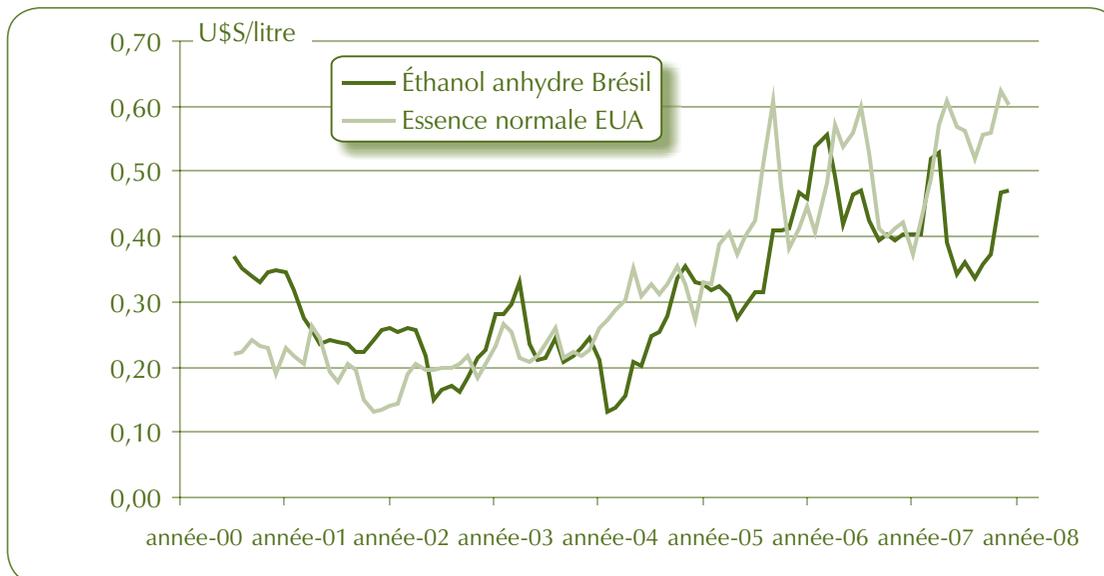
7.3 Viabilité économique du bioéthanol de canne à sucre

Il est fondamental, pour la durabilité de la production de bioéthanol, que les coûts de sa production (incluant toute l'activité agro-industrielle et les coûts associés aux investissements dans la mise en place des plantations de canne et des unités industrielles) soient couverts par les résultats économiques de cette agro-industrie. Quelques aspects économiques ont été commentés aux chapitres précédents, comme les mécanismes de formation de prix, la compétitivité du bioéthanol face à la production de sucre, l'importance économique du secteur du sucre et de l'alcool et les tendances sur une réduction soutenue des coûts au cours des dernières décennies. On reprend ci-après l'analyse économique du bioéthanol, en présentant les aspects de la compétitivité face au pétrole, la structure de coûts du bioéthanol au Brésil et les perspectives d'évolution du prix de ce biocarburant au cours des années à venir. Il est important de reconnaître, ces dernières années, que l'on a assisté à une volatilité significative des prix et des taux de change, ce qui rend une analyse économique difficile. Cependant, pour les conclusions générales recherchées, les résultats présentés ci-après sont suffisamment représentatifs.

Le faible coût de production du bioéthanol de canne à sucre au Brésil est un fait bien connu. Selon diverses sources, on estime qu'en incluant tous les intrants et les facteurs de production, son coût se situe entre 0,25 US\$/litre et 0,30 US\$/litre, ce que équivalerait à un prix du pétrole situé entre 36 US\$/baril et 43 US\$/baril. Cette équivalence se base d'un côté sur un prix de l'essence 10% plus élevé que la valeur du pétrole brut en volume, et de l'autre côté, sur la substitution de l'essence par le bioéthanol anhydre sur une base paritaire en termes volumétriques (cette dernière supposition est consistante, spécialement quand on considère un taux de mélange du bioéthanol dans l'essence inférieur à 10% - E10). Dans de telles conditions, la viabilité de l'utilisation du bioéthanol en substitution à l'essence semble évidente, mais une confirmation plus décisive de l'avantage de ce biocarburant s'impose lorsqu'on compare les prix hors taxes dans les unités de production.

Le Graphique 30 montre comment ont évolué les prix payés aux producteurs de bioéthanol de canne à sucre et ceux de l'essence, sans frets et sans taxes, se référant respectivement au prix du bioéthanol anhydre dans l'Etat de São Paulo donné par le Centre d'Etudes Avancées en Economie Appliquée (Cepea), de l'Ecole Supérieure d'Agriculture Luiz de Queiroz de l'Université de São Paulo, et le prix libre (*spot*) de l'essence normale sur la côte du Golfe du Mexique (U.S. Gulf Coast Conventional Gasoline Regular Spot Price FOB), indiqué par l'Energy Information Administration des EUA (EIA, 2008). Le Cepea suit régulièrement les prix des négociations du bioéthanol anhydre et hydraté dans quatre états brésiliens (São Paulo, Alagoas, Pernambuco et Mato Grosso), constituant ainsi une des sources d'information les plus fiables du marché.

Graphique 30 – Evolution des prix payés au producteur, sans taxes, d'essence aux EUA et de bioéthanol de canne à sucre au Brésil



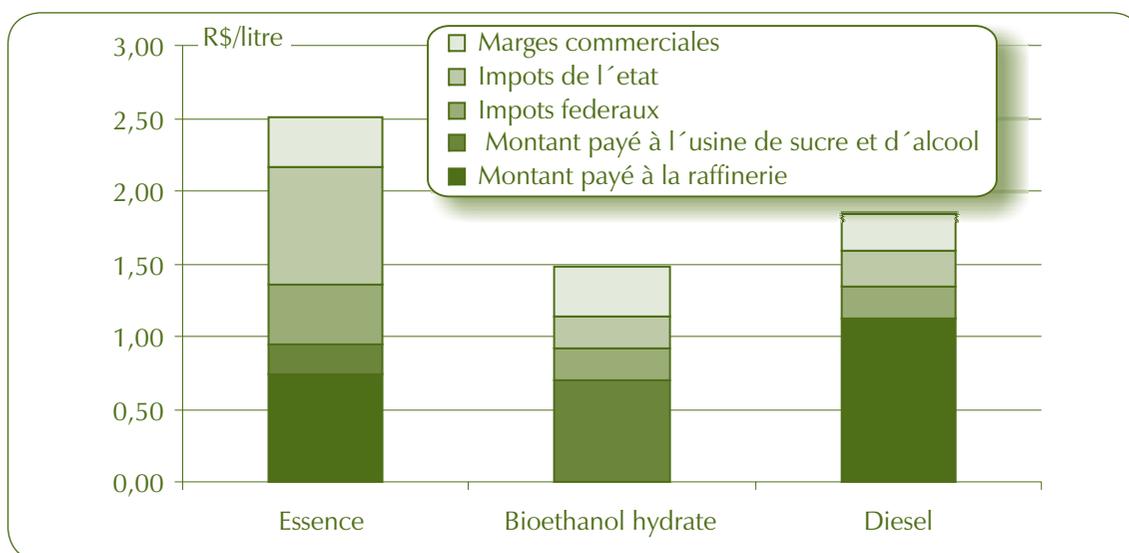
Sources : Chiffres empruntés au Cepea (2008) et EIA (2008).

L'adoption de la monnaie nord-américaine permet de comparer les prix aux EUA et au Brésil, mais elle doit être considérée avec prudence, en raison de la dévaluation significative de cette devise à partir de 2005, avec une chute de près de 30% en deux ans, qui tend à surestimer la valeur du bioéthanol produit au Brésil. De toute manière, comme on peut le constater sur les courbes des dernières années, le bioéthanol de canne à sucre a commencé à présenter des prix substantiellement plus attractifs que ceux de l'essence, au niveau du producteur, sans tenir compte ni des taxes ni des subsides quelconques. En peu de mots, ceci signifie que, dans ces conditions, l'addition de bioéthanol anhydre permet de réduire le prix moyen du combustible placé sur le marché.

Dans les conditions brésiliennes, le niveau des taxes fédérales et des états est différencié entre les divers combustibles, en raison des implications économiques et des applications typiques de chacun d'entre eux, privilégiant l'huile diesel et les biocarburants. Ainsi, sur l'essence, s'applique un niveau plus élevé de taxes en comparaison avec le bioéthanol hydraté, le gaz naturel pour véhicules et l'huile diesel. Il existe une variation raisonnable des taux d'impôts des états (Impôt sur la Circulation des Marchandises et Services – ICMS), mais, en présentant comme valeurs de référence la situation à Rio de Janeiro en mars 2008, on peut affirmer que les impôts, les frets et les marges de commercialisation qui s'appliquent sur les prix des producteurs, pour l'essence, le bioéthanol hydraté et le diesel augmentent leur prix, respectivement, de 239%, 112% et 63%, comme le montre le Graphique 31. On observe sur ce

graphique que le montant payé au producteur d'essence se réfère à un volume de 0,75 litre, étant donné que le produit livré au consommateur contient 25% d'éthanol anhydre.

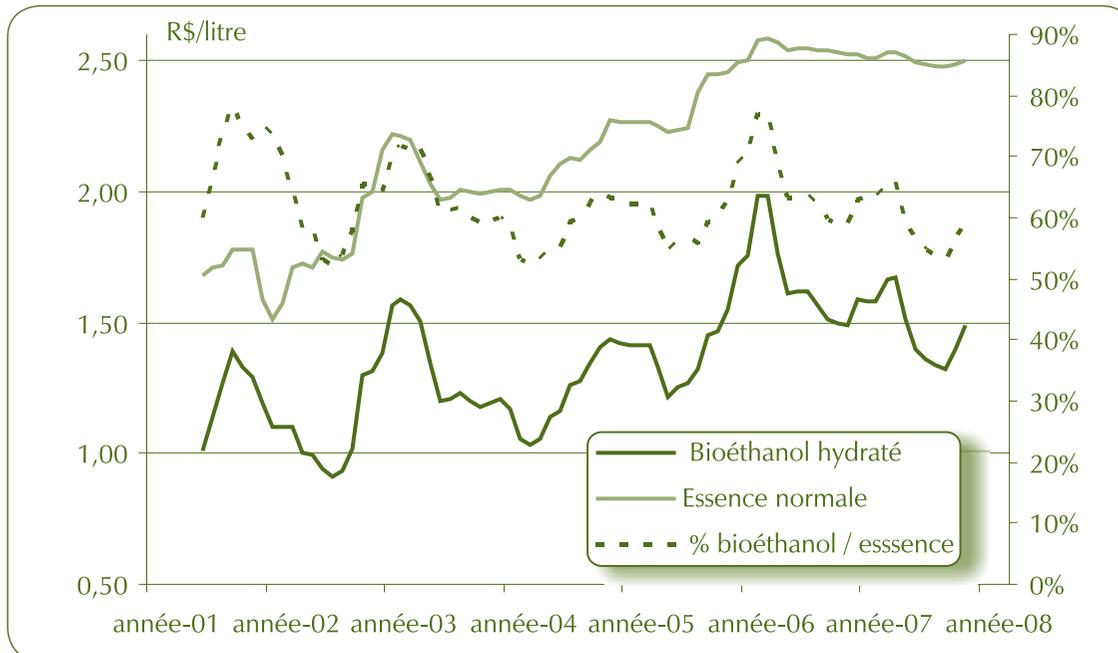
Graphique 31 – Structure des prix de l'essence normale, du bioéthanol hydraté et de l'huile diesel à Rio de Janeiro en mars 2008



Sources : Montants calculés sur base de l'ANP (2007), Cepea (2008) et Petrobras (2008).

Une autre forme pour évaluer l'attrait du bioéthanol face aux combustibles conventionnels est de comparer le prix moyen de vente au consommateur du bioéthanol hydraté avec le prix pratiqué pour l'essence normale. Dans cette logique, on peut utiliser les relevés de prix des combustibles, disponibles régulièrement auprès de l'Agence nationale du pétrole, du gaz naturel et des biocarburants, appliqués sur un large échantillonnage qui couvre tout le territoire brésilien [ANP (2007)]. En observant les séries de prix, on constate que le bioéthanol hydraté présente une bonne compétitivité à l'égard de l'essence (évaluée en coût par kilomètre parcouru) en fonction de son prix plus bas, au niveau des producteurs, et aussi à l'égard du tarif fiscal favorable, commenté au paragraphe précédent. En particulier, concernant le cas des véhicules *flexible fuel*, qui permettent à l'utilisateur d'opter pour le combustible qu'il va utiliser au moment de faire le plein, le bioéthanol est adopté, en général, jusqu'à une limite de 70% du prix de l'essence. Dans ce contexte, on observe que durant la majeure partie des dernières années, utiliser le bioéthanol au lieu de l'essence est devenu plus intéressant, excepté durant de rares et courtes périodes de quelques semaines, comme le montre le Graphique 32. Dans ce graphique, on peut observer également le modèle approximativement régulier de variation des prix, qui montent en fin de récolte et baissent au début de celle-ci, vers le milieu du premier semestre.

Graphique 32 – Evolution des prix moyens au consommateur du bioéthanol hydraté et de l'essence normale et du rapport entre ces prix au Brésil



Source : Elaboré sur base de l'ANP (2007).

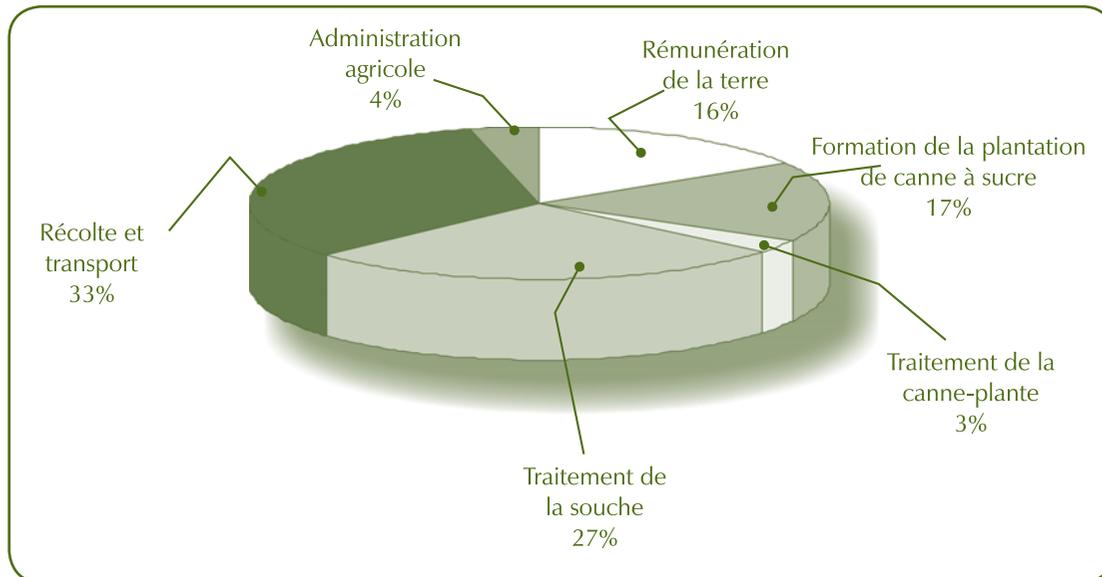
Les données antérieures se rapportent aux montants pratiqués effectivement sur les marchés des combustibles, signalant de façon claire la compétitivité du bioéthanol pour les consommateurs. Cependant, il est également intéressant d'évaluer les coûts de production de ce biocarburant et de vérifier si les prix ont rémunéré de manière adéquate les producteurs. Pendant longtemps, au Brésil, les coûts de l'agro-industrie du sucre et de l'alcool étaient vérifiés par un audit du gouvernement fédéral, qui définissait tous les prix le long de la chaîne de production et de commercialisation. Cependant, à partir de la récolte de 1998, commença le processus de libération de cette agro-industrie, conclu en 2002, comme expliqué en détail dans le chapitre précédent. Actuellement, les agents économiques décident leurs prix librement, sur base de stratégies de la logique de marché, en tenant compte des stocks et des perspectives d'évolution des marchés du sucre et des combustibles. Dans ce contexte compétitif, estimer les coûts est une tâche généralement complexe, car, outre la grande diversité des situations, avec différentes productivités et technologies utilisées, le principal composant du coût du bioéthanol est la matière première, qui peut être produite par la société qui la traite sur des terrains loués ou cultivés par des producteurs indépendants. La difficulté de connaître les coûts de production de manière sûre n'est pas seulement la caractéristique du marché du bioéthanol : de façon analogue, les coûts de production détaillés pour le pétrole et le gaz naturel sont peu disponibles.

Dans l'étude réalisée par le Nipe/Unicamp, on a estimé pour la région Centre-Sud, en 2005, un coût moyen de R\$ 33,16 par tonne de canne rendue dans la cour de l'usine, et broyé comme le montre le Graphique 33 [CGEE (2005)]. Dans cette même étude, on estime un coût de R\$ 24,59 par tonne de canne à Goiás, spécialement à cause du coût plus faible de la terre.

L'Association Rurale des Fournisseurs et des Planteurs de Canne du Moyen Sorocabana (Assocana) a fait une évaluation plus récente des coûts de production de la canne à sucre, en tenant compte d'un cycle de cinq coupes en six ans et en incluant les activités d'implantation de la culture de canne à sucre, la préparation du sol, la mise en terre des boutures, la récolte et le transport, et en prenant en considération tous les facteurs de production (intrants, équipements, terre, main-d'oeuvre) [Assocana (2008)]. Cette étude estime pour avril 2008 un coût moyen de R\$ 2.513,50 par hectare, pour chaque coupe, ce qui donne comme coût moyen de la canne R\$ 35,00. Considérant un prix de la matière première entre R\$ 26,00 et R\$ 35,00, un taux de change de R\$ 2,00 par US\$ et une productivité industrielle de 85 litres de bioéthanol par tonne de canne traitée, il en résulte que la contribution de la matière première au coût du bioéthanol est de US\$ 0,153 à US\$ 0,206 par litre. Ces chiffres semblent être représentatifs des coûts moyens actuels dans la Région Centre-Sud brésilienne et se situent bien au-dessus des US\$ 0,12 par litre que l'on indiquait habituellement comme étant la part de matière première présente dans le coût du bioéthanol à la fin des années 1990, bien qu'il faille observer que ce prix a été assez inflationné ces dernières années en fonction de l'augmentation des coûts des équipements, des fertilisants et des produits agrochimiques, entre autres. Du point de vue des applications alternatives de cette matière première, la valeur de la tonne de canne va dépendre naturellement des prix du sucre, qui ont atteint des niveaux de US\$ 0,27 par litre de bioéthanol équivalent au milieu de l'année dernière.

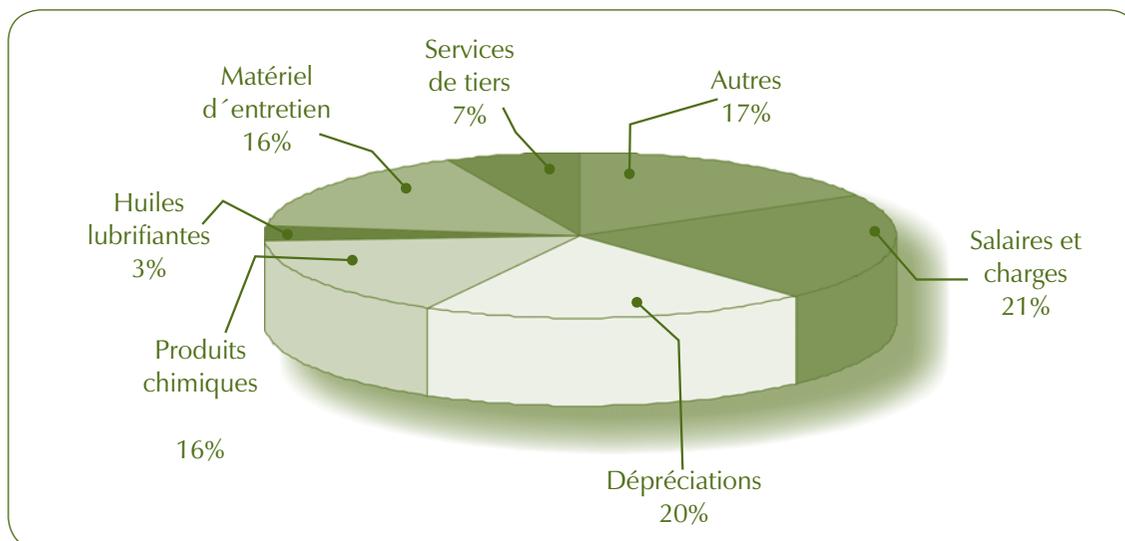
Les coûts relatifs à l'investissement industriel, à l'opération et à la manutention de l'unité de traitement de la canne et la production de bioéthanol ont également augmenté ces dernières années, spécialement à cause des augmentations des prix des équipements et des matériels. L'étude réalisée par le Nipe/Unicamp a estimé qu'une usine d'une capacité annuelle de traitement de deux millions de tonnes de canne à sucre pourrait coûter près de US\$ 97 millions. Cela correspond à des coûts de capital de US\$ 0,13, estimés pour un taux interne de rémunération de 12% et un rapport dette/capital de 50%, avec 8% de taux d'intérêt et une production de 40 kWh d'énergie électrique excédente par tonne de canne traitée, commercialisés à US\$ 57 par MWh. Pour cette unité, on a estimé les coûts d'opération et de manutention (y compris la dépréciation) de US\$ 0,07 par litre de bioéthanol produit, avec la structure présentée au Graphique 34 [CGEE (2005) et Almeida et al. (2007)].

Graphique 33 – Structure des coûts de production de la canne à sucre dans le Centre-Sud en 2005



Source : CGEE (2005).

Graphique 34 – Structure du coût d'opération et de maintenance d'une distillerie autonome pour la production de bioéthanol de canne à sucre au Centre-Sud en 2005



Source : CGEE (2005).

Dans ce contexte, en considérant tous les facteurs – matière première, opération, manutention et investissement –, le coût du bioéthanol de canne à sucre se situe entre US\$ 0,353 et US\$ 0,406 par litre de bioéthanol, valeurs correspondantes au pétrole entre US\$ 50 et US\$ 57 le baril équivalent.

Il est probable que, dans les usines en phase d'implantation dans les nouvelles zones productrices, les coûts du bioéthanol soient inférieurs, compte tenu de la localisation de ces usines, avec une plus forte densité des plantations de canne à sucre (coûts de transport plus bas) et du fait qu'elles se consacrent uniquement à la production de biocarburant, réduisant ainsi les coûts de la matière première et les investissements. D'un côté, considérant les usines plus anciennes et déjà complètement amorties, le bioéthanol devra présenter des coûts d'ordre financier plus faible ; de même, les niveaux plus élevés de production d'énergie électrique sur la base de la bagasse tendent d'une manière générale à améliorer les indicateurs de cette agro-industrie. Une autre remarque importante concerne l'impact du taux de change adopté, car la valorisation significative de la monnaie brésilienne ces dernières années a fait croître la valeur des produits de l'agro-industrie du sucre et de l'alcool, quand on les évalue en devises.

Considérant les possibilités de continuité dans le processus d'augmentation de la productivité agricole et industrielle, présentées précédemment, il est raisonnable d'espérer que les coûts de production du bioéthanol de canne à sucre demeurent stables ou se réduisent en termes relatifs, tandis que, du côté des combustibles fossiles, les scénarios attendus sont le maintien des prix élevés, sans perspectives de réduction aux niveaux pratiqués il y a quelques décennies [IEA (2007)]. Donc, du point de vue économique, la production de bioéthanol de canne à sucre se révèle durable, avec des prix et des coûts effectivement viables, sans nécessité de subsides pour soutenir la compétition avec les combustibles conventionnels.

7.4 Création d'emplois et de revenu dans l'agro-industrie du bioéthanol

Le rapport important entre la production de bioéthanol de canne à sucre et la demande de main-d'oeuvre est un thème central sur la bioénergie au Brésil et certainement déterminant pour sa viabilité sociale. L'agro-industrie de la canne à sucre est créatrice d'emplois : sur base du Rapport Annuel d'Informations Sociales (Rais), du Ministère du Travail et de l'Emploi, et de l'Enquête Nationale par Échantillonnage de Domiciles (PNAD), réalisée périodiquement par l'IBGE, on estime qu'en 2005, 982.000 travailleurs étaient engagés directement et formellement dans la production du sucre et de l'alcool [Moraes (2005)]. D'après une étude basée sur la Matrice Intrans-Produit de l'économie brésilienne, en 1997, pour chaque emploi direct dans ce secteur, il existe 1,43 emploi indirect et 2,75 emplois induits [Guilhoto (2001)], ce qui permet d'estimer pour 2005 un total de 4,1 millions de personnes dépendant, d'une

manière ou d'une autre, de l'activité de l'agro-industrie de la canne, au cas où ces rapports demeurent inchangés. Ces emplois se répartissent de manière importante dans une bonne partie du territoire brésilien et couvrent une gamme de compétences et de formations, mais, dans leur majeure partie, ce sont des emplois de basse qualification.

Avec l'évolution des technologies employées, on observe une croissance plus lente des besoins en personnel, ainsi qu'une élévation de la formation requise et une augmentation de la qualité du travail exécuté. Cette dynamique a motivé de nombreuses études dans le contexte de l'économie et de la sociologie rurales, qui donnent une vision complète des processus en cours et de leurs implications. Les prochains paragraphes aborderont les questions associées à la création d'emplois et de revenu dans le contexte de la production de bioéthanol. Initialement, on reverra les données relatives des niveaux d'emplois et leur évolution récente, pour discuter ensuite leurs perspectives, spécialement celles associées à l'expansion de la mécanisation de la récolte de la canne.

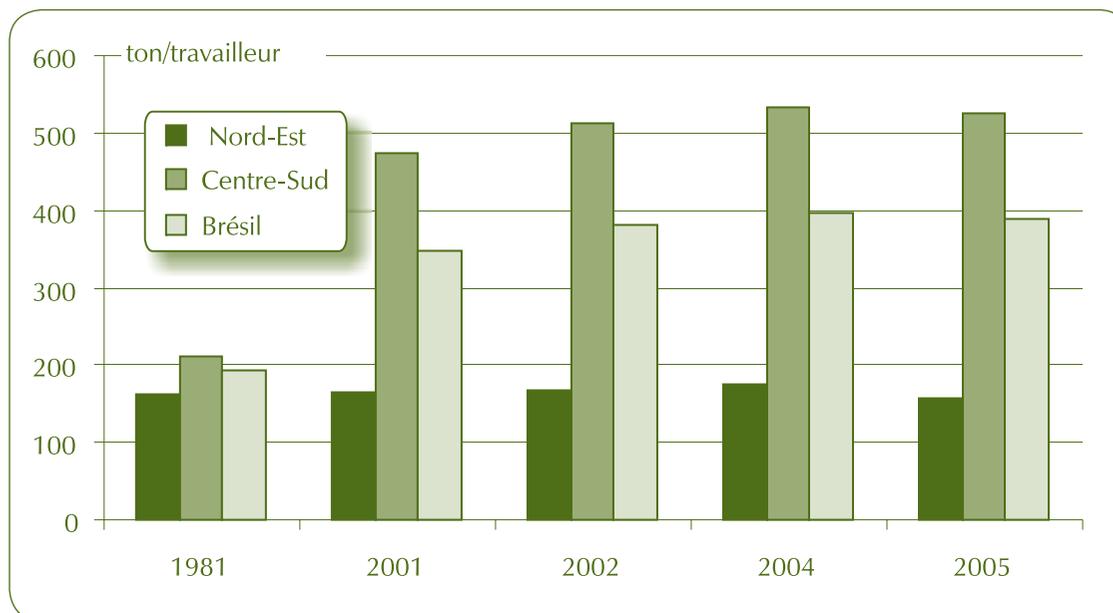
Dans le total des emplois directs et formels de l'agro-industrie du sucre et de l'alcool, qui s'est développée de manière significative ces dernières années, comme le montre le Tableau 33, où 63% se rapportent au Centre-Sud où l'on produit plus de 85% de la canne brésilienne, ce qui signifie une augmentation de la productivité du travail dans cette région. Dans ce contexte, le nombre de travailleurs par unité de production dans la région Nord-Est est de trois à quatre fois plus élevé que celui observé dans la région Centre-Sud [Macedo (2005)]. En effet, en mettant en rapport les données de production de canne [Mapa (2007)] avec le nombre de personnes employées dans le secteur [Moraes (2007)], on obtient la productivité par travailleur, indiquée par le Graphique 35. Ce graphique démontre de façon évidente le gain de productivité significatif dans l'agro-industrie dans la Région Centre-Sud, avec des niveaux supérieurs à 500 tonnes de canne par travailleur, tandis qu'aucune altération n'est constatée pour la région Nord-Est.

Tableau 33 – Emplois directs formels par activité et région du secteur du sucre et de l'alcool

| Activité | Région | Année | | | |
|--------------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|
| | | 2000 | 2002 | 2004 | 2005 |
| Production de canne | Nord Nord-Est | 81.191 | 86.329 | 104.820 | 100.494 |
| | Centre Sud | 275.795 | 281.291 | 283.820 | 314.174 |
| | Brésil | 356.986 | 367.620 | 388.121 | 414.668 |
| Production de sucre | Nord Nord-Est | 143.303 | 174.934 | 211.864 | 232.120 |
| | Centre Sud | 74.421 | 126.939 | 193.626 | 207.453 |
| | Brésil | 217.724 | 301.873 | 405.490 | 439.573 |
| Production de bioéthanol | Nord Nord-Est | 25.730 | 28.244 | 26.342 | 31.829 |
| | Centre Sud | 42.408 | 66.856 | 80.815 | 96.534 |
| | Brésil | 68.138 | 95.100 | 107.157 | 128.363 |
| Toutes productions | Brésil | 642.848 | 764.593 | 900.768 | 982.604 |

Source : Moraes (2005).

Graphique 35 – Productivité moyenne des travailleurs de l’agro-industrie de la canne à sucre au Brésil



Source : Moraes (2005).

La plantation de la canne, les opérations culturales et, principalement, sa récolte, représentent les besoins les plus importants en personnel temporaire dans une usine de sucre et de bioéthanol, correspondant à environ 70% de la main-d’œuvre engagée, avec des niveaux d’emplois distincts pour les périodes de récolte et entre deux récoltes. Pour une unité agro-industrielle moderne, qui traite annuellement deux millions de tonnes de canne, environ 2.500 personnes sont nécessaires, nombre qui peut varier assez bien en fonction du degré technique de l’usine et du niveau de mécanisation [Macedo (2005)]. Dans l’étude réalisée par le Nipe/Unicamp, considérant des groupes de 15 usines productrices de bioéthanol, d’une capacité de broyage également de deux millions de tonnes de canne chacune, on estime une création totale de 22.000 emplois [CGEE (2005)].

Le rapport entre les niveaux d’emploi durant la récolte et entre deux récoltes est dénommé coefficient de saisonnalité et permet de vérifier la variabilité de la demande de personnel au cours de l’année. La saisonnalité des emplois dans l’agro-industrie de la canne se réduit suite à l’extension des récoltes et à l’augmentation de la mécanisation. Les valeurs, à São Paulo, sont passées de 2,2 en 1980, à 1,8 à la fin des années 1980, et ont atteint 1,3 au milieu des années 1990 [Macedo (2005)]. A titre de référence, le coefficient de saisonnalité du riz est 7, celui des haricots noirs se situe entre 3 et 4,5, celui de l’orange est de 7,8, celui du soja oscille entre 3,5 et 12 et celui du coton atteint 40, ce qui signifie que l’emploi dans ces cultures au cours du temps est bien plus inégal que dans le cas de la canne [Leite (1990)].

Outre le nombre de postes de travail offerts, leur qualité est également importante. Dans ce sens, il est intéressant de réviser le travail de Balsadi (2007) sur l'évolution de la qualité de l'emploi dans l'agriculture brésilienne entre 2001 et 2004, pour les principales cultures et les différents types de rapports de travail. Sur base des données détaillées du PNAD, on a adopté comme variables le niveau éducatif des employés, le degré de formalité de l'emploi, le rendement reçu au travail principal et les aides reçues par les employés, pour définir les indices quantitatifs et établir une évaluation objective de la qualité des emplois. Ses conclusions indiquent des améliorations importantes dans divers indicateurs socio-économiques pour les travailleurs dans la culture de la canne à sucre au Brésil ces dernières années :

- Augmentation du niveau de titularisation de l'emploi, avec un pourcentage élevé de travailleurs titulaires d'une carte de travail signée (ce qui donne accès à la pension et à d'autres droits, comme le paiement d'heures supplémentaires et l'assistance médicale), ce qui fait de la culture de la canne à sucre une des activités dotées du meilleur niveau de titularisation en milieu rural ;
- Gains réels de salaires entre 1992 et 2005, de 34,5% pour les employés permanents avec résidence urbaine, de 17,6% pour les permanents ruraux, de 47,6% pour les temporaires urbains et de 37,2% pour les temporaires ruraux ; et
- Augmentation et diversification des bénéfices reçus par les travailleurs, comme les aides pour le transport et l'alimentation dans toutes les catégories, outre l'aide au logement pour les résidents ruraux et l'aide-santé pour les employés permanents résidant en ville.

Dans cette étude, on montre encore comme faits positifs la réduction significative du travail infantile (participation de 0,8% à peine en 2004, en comparaison avec 1993, dans le Pernambuco où 25% des coupeurs de canne étaient âgés de 7 à 17 ans) et l'augmentation de la scolarité des employés. D'autres chercheurs ont exposé des conclusions similaires, renforçant le rôle de l'organisation des travailleurs, des conventions collectives de travail et de la législation travailliste, comme composants importants dans l'obtention de ces progrès. C'est le cas particulier de la Région Centre-Sud où le niveau moyen de scolarité des travailleurs dans la production de canne et dans l'industrie du bioéthanol, en 2005, était supérieur à cinq et à neuf ans, respectivement. Dans les mêmes conditions, le salaire moyen en 2005 était de US\$ 280,00 et US\$ 509,00, respectivement, pour la production de canne et de bioéthanol [Moraes (2007)].

Malgré les améliorations obtenues, il existe encore des situations difficiles, principalement pour les employés temporaires occupés à la récolte annuelle de la canne à sucre où les conditions de travail sont bien plus ardues que dans l'industrie et où le système de paiement adopté est fonction du volume de canne coupée. D'aucuns mettent en question ce système, affirmant qu'il cause des situations de fatigue extrême pour les coupeurs de canne [Alves (2006)]. Cependant, ce thème est objet de controverse. La fin du paiement par production ne

fait pas l'unanimité des syndicats, et une partie des travailleurs est en faveur de son maintien. Comme représentant des usines, l'Unica s'est montrée opposée à la fin de ce système de rémunération, bien qu'elle déclare chercher, avec les usines, à garantir l'accomplissement effectif des normes en vigueur visant le paiement correct des coupeurs, conformément aux dispositions des conventions collectives de travail [Moraes (2007)].

Dans ce contexte de valorisation accrue du travailleur, l'agro-industrie de la canne traverse une transition importante, conséquence des gains de productivité agro-industrielle, associés aux innovations mécaniques, physiques, chimiques et biologiques, qui permettent d'augmenter la production tout en maintenant la demande d'intrants et de ressources. Parmi ces innovations, citons la mécanisation croissante de la récolte, découlant à son tour de la nécessité d'éliminer progressivement le brûlis au cours des prochaines années, et de réduire les coûts de la récolte, entre autres facteurs. On estime que, pour la saison 2006/2007, la récolte mécanisée a été adoptée dans 40% des plantations de canne à sucre dans le Centre-Sud, suivant une tendance croissante, en fonction de laquelle plus de 400 récolteuses mécaniques sont vendues chaque année, chacune d'elles exécutant le travail de 80 à 100 coupeurs de canne [CGEE (2007)]. Tôt ou tard, ce modèle de production de canne sera reproduit dans d'autres régions de Brésil, avec un impact évident sur le niveau d'emploi. Pendant la période 2000–2005, face à une augmentation de 28,8% dans la production de canne, l'expansion du nombre d'emplois a été de 18%. On estime qu'à partir de 2020, il n'existera pratiquement plus de coupe manuelle de canne dans l'État de São Paulo, et l'on prévoit également que, entre 2006 et 2020, l'effectif des employés de l'agro-industrie de la canne à sucre dans cet état passera de 260.000 à 146.000 travailleurs, même avec une augmentation 20.000 emplois dans l'industrie [Moraes (2007)].

Pour affronter ces nouveaux temps, deux lignes d'action, en rapport direct avec les travailleurs, peuvent être mises en oeuvre : d'une part, en offrant et en stimulant des activités économiques alternatives pour les travailleurs potentiellement démis dans leurs lieux d'origine, et d'autre part, en renforçant la préparation de ressources humaines pour l'agro-industrie. Dans les deux cas, il ne s'agit pas de tâches triviales, mais il importe de les traiter comme priorité. L'élévation des exigences de formation de personnel par les usines brésiliennes, dans tous les domaines et aux divers niveaux de responsabilité, a déjà motivé un grand effort en vue de répondre à cette demande croissante de main-d'oeuvre spécialisée, en particulier au moyen de cours de niveau moyen et supérieur orientés spécifiquement vers la production de canne et de bioéthanol. Une troisième possibilité serait de réduire le rythme de la perte d'emplois pour les coupeurs de canne, par exemple, en adoptant des technologies intermédiaires comme l'Unité Mobile d'Aide à la Récolte (Unimac), qui ne remplace qu'en partie la main-d'oeuvre, représentant d'avantage de sécurité et de confort pour les coupeurs de canne sans brûlis et avec récupération de la paille [Alves (2007)].

Il convient d'observer que, même avec des réductions significatives de la demande de main-d'oeuvre, le bioéthanol de canne à sucre sera toujours générateur d'emplois. Dans les conditions actuelles et par unité d'énergie produite, la production du bioéthanol, comparée à celle

du charbon minéral, de l'hydroélectricité et du pétrole, requiert respectivement, 38, 50 et 152 fois plus de travail humain [Goldemberg (2002)]. Par exemple, alors que chaque véhicule utilisant comme combustible des dérivés du pétrole requiert un homme-an de travail pour assurer sa consommation, Leal (2005) montre que l'introduction de 24% de bioéthanol comme additif à l'essence élève cette demande de personnel à six hommes-an et, si on utilise le bioéthanol hydraté pur, ce même véhicule aura besoin de 22 travailleurs pour produire son biocarburant.

La création d'opportunités de travail et la perspective de leur distribution parmi les travailleurs de la valeur ajoutée dans la chaîne productive sont deux des caractéristiques les plus importantes de la bioénergie et, en particulier, du bioéthanol de canne à sucre, et constitue un différentiel important entre cette technologie énergétique et ses celles provenant d'autres cultures. Même si l'on adoptait des technologies de haute productivité et de moindre impact sur la demande de main-d'oeuvre, tendance apparemment inexorable, la production de bioéthanol demeurera une grande créatrice d'emplois, avec une qualité toujours meilleure et avec une élévation des exigences de formation et de rémunération moyenne. En outre, il est important de reconnaître le rôle notable de l'activité agro-industrielle comme créatrice de revenu et comme levier de l'activité économique locale et régionale, avec des bénéfices indirects significatifs. On ne peut considérer en aucune manière les activités exténuantes et de basse productivité comme inhérentes à la bioénergie. La réduction progressive de la récolte manuelle de la canne doit être vue comme un progrès souhaitable et dans le sens d'une plus grande durabilité dans cette agro-industrie.

L'éthanol de canne à sucre et la question des propriétés de terres

Un aspect lié au rôle du bioéthanol dans la création d'emplois et de revenu en milieu rural est en rapport avec la concentration des propriétés de terres associée à l'expansion de sa production. De manière générale, ce thème s'insère dans un des principaux défis pour le développement harmonieux de l'économie brésilienne : la compatibilité des demandes sociales pour l'accès à la terre, avec la mise en oeuvre d'une base productive efficiente et compétitive en milieu rural. Dans le cas de l'agro-industrie du sucre et de l'alcool, cette question gagne une densité accrue en raison des superficies occupées et du niveau de verticalisation existant, sur lequel pèse l'existence de milliers de fournisseurs de canne et de locataires des terres. En effet, la production de canne et de bioéthanol présente une économie d'échelle significative, qui se développe grâce à l'adoption progressive des technologies plus productives et à la dilution correspondante des coûts fixes en raison d'un plus grand volume de produit. Dans ces conditions, dans les unités de plus grande capacité, on constate une réduction effective des coûts, justifiant le processus de concentration progressive des propriétés, dans le cadre de la législation agraire.

Cette tendance est aggravée par le faible attrait d'une grande partie des activités d'agriculture et d'élevage et par le vide économique de certaines régions, où la culture de la canne à sucre devient une des rares alternatives viables, si l'on considère seulement les cultures tradition-

nelles. Comme dans les autres aspects commentés aux paragraphes précédents, il incombe à l'État de jouer un rôle décisif, pour stimuler non seulement la production bioénergétique, mais aussi celle d'autres biens d'agriculture et d'élevage, préservant ainsi l'efficacité économique et les petits entrepreneurs ruraux. Il ne semble pas qu'il y ait ici un conflit insoluble, surtout face à l'ample disponibilité de terres et aux perspectives des marchés agricoles, y compris des alternatives innovatrices de culture et d'élevage, qui permettent un gain de valeur par unité de production plus important que dans la production bioénergétique.

Cependant, pour préserver l'agriculture familiale et son modèle de production agricole, il a été suggéré d'encourager la production de biocarburants de manière décentralisée et à des échelles qui permettent l'insertion du petit agriculteur en tant que producteur de biocarburant, associée à l'implantation de pratiques agroécologiques et à une éventuelle réduction de déplacements entre les zones productrices et les centres consommateurs. Ces possibilités doivent encore démontrer leur viabilité, étant donné que l'on présuppose des modèles productifs assez différents de ceux pratiqués actuellement. L'expérience réduite des micro et minidistilleries de bioéthanol, pour la production de 1.000 à 5.000 litres par jour (valeurs typiques), respectivement, ne permet pas d'assurer qu'elles constituent une alternative à promouvoir, et elle requiert une vision innovante de la technologie de production du bioéthanol de canne à sucre. À ce titre, un point important est la nécessité d'associer la production de bioéthanol à d'autres activités d'agriculture et d'élevage, de manière à compenser les activités à basse productivité, caractéristique inhérente à ces unités, avec des systèmes d'extraction, de fermentation et de distillation nécessairement simplifiés, permettant une productivité de 40 litres de bioéthanol par tonne de canne traitée, soit environ la moitié du rendement constaté dans les usines de plus grande taille [Horta Nogueira (2006)]. Une possibilité à exploiter pour améliorer cette situation serait l'association de la production de bioéthanol avec l'élevage bovin, qui pourrait valoriser la bagasse disponible durant la récolte, comme élément volumineux dans l'alimentation du bétail destiné à l'abattoir. De toute manière, dans l'analyse de systèmes efficaces, la production de bioéthanol de canne à sucre s'est révélée plus adéquate, jusqu'ici, à des échelles industrielles, et probablement, pour les coopératives de producteurs associées aux usines conventionnelles, c'est une alternative plus consistante que celle des petites usines productrices.

Toujours à propos de la concentration économique et de ses implications, il est nécessaire de constater que l'agro-industrie du bioéthanol, telle que pratiquée au Brésil, pourra être considérée comme facteur relatif de concentration, si on la compare à d'autres activités agricoles et d'élevage, bien que, comparée aux activités de nature énergétique, parmi lesquelles on peut la classer également, elle se présente comme une industrie hautement décentralisée, avec des milliers de fournisseurs et avec les groupes industriels plus importants qui ne parviennent pas à contrôler 10% de la capacité totale de production. En effet, la décentralisation est une caractéristique incontournable de la bioénergie, qui a besoin de larges espaces pour capter l'énergie solaire.

Effets induits en d'autres secteurs de l'économie

L'articulation globale de l'agro-industrie du bioéthanol avec d'autres secteurs économiques, en amont et en aval de la production et du traitement de la canne à sucre, distribue les bénéfices obtenus dans ce secteur d'une façon assez intéressante. Un relevé dans ce sens, utilisant un modèle élargi de matrices intrant-produit, montre comment toute l'économie nationale tend à se développer en fonction de la croissance de la production du bioéthanol [CGEE (2005)]. Sans parler, bien sûr, des secteurs producteurs de canne à sucre et d'éthanol, et en comptant les effets indirects et induits, les secteurs de produits chimiques divers (qui incluent les fertilisants), le raffinage de pétrole, le commerce, la logistique et les locations d'immeubles, seront les plus touchés.

Tableau 34 – Impacts directs, indirects et induits pour le traitement d'un million de tonnes de canne à sucre pour la production d'alcool

| Secteur | Valeur de production (R\$ million) | Valeur ajoutée (R\$ million) | Emplois |
|---|------------------------------------|------------------------------|--------------|
| Canne à sucre | 44,5 | 20,8 | 1.467 |
| Produit de l'agriculture et de l'élevage | 14,3 | 8,1 | 697 |
| Sucre | 8,0 | 2,7 | 31 |
| Alcool | 97,8 | 38,9 | 211 |
| Electricité | 6,8 | 7,3 | 37 |
| Extraction minérale | 0,3 | 0,2 | 4 |
| Sidérurgie, exploitation minière et métallurgie | 7,1 | 2,1 | 48 |
| Machines, véhicules et pièces | 9,3 | 4,2 | 51 |
| Pétrole et gaz | 29,5 | 12,1 | 12 |
| Secteur chimique | 13,9 | 4,7 | 41 |
| Aliments | 15,4 | 3,1 | 93 |
| Construction civile | 1,3 | 0,8 | 23 |
| Produit de la transformation | 16,8 | 5,7 | 287 |
| Commerce et services | 81,3 | 53,0 | 2.679 |
| Familles | – | 7,3 | – |
| Total | 346,3 | 171,0 | 5.683 |

Source : Scaramucci et Cunha (2008).

Utilisant une matrice ajustée pour 2002 et considérant les résultats obtenus comme indicatifs, on estime dans cette étude que, pour mettre en production une unité d'une capacité annuelle d'un million de mètres cubes de bioéthanol, on réunirait R\$ 119 millions par an

du aux investissements. Durant l'opération, environ R\$ 1,46 milliard serait produit annuellement, en comptant les effets directs, indirects et induits [CGEE (2005)]. Dans une extension de cette étude, pour les conditions observées dans le Centre-Sud brésilien, on estime que le traitement d'un million de tonnes de canne destinée à la production de bioéthanol correspond à une augmentation de R\$ 171 millions dans la production économique et à la création de 5.683 emplois, considérant en parallèle les effets directs, indirects et induits comme le montre le Tableau 34.

7.5 Certification et durabilité de l'agro-industrie du bioéthanol

Pour assurer l'observation des critères de durabilité dans la production de bioéthanol et de biodiesel, il a été proposé, principalement par des pays industrialisés, des systèmes de certification pour garantir explicitement que les biocarburants soient produits et distribués de manière suffisamment durable, et peuvent donc être utilisés à des fins environnementales.

L'établissement de critères et de modèles de durabilité largement acceptés rencontre comme difficulté principale la complexité inhérente de systèmes bioénergétiques, avec leur gamme de matières premières, de technologies, et de contextes de production. Il convient de noter encore que les systèmes de certification pour biocarburants, sur des bases volontaires ou obligatoires, ne disposent pas encore d'un ensemble de normes légales pour leur soutien, bien que ces systèmes puissent être un jour utilisés dans le contexte des engagements d'atténuation du changement climatique, de la protection de la biodiversité et des traités commerciaux.

La certification est typiquement une exigence imposée par les consommateurs aux producteurs. De cette manière, la conception de systèmes de certification impose un traitement objectif et soigné des aspects de durabilité, et leur mise en oeuvre implique nécessairement l'existence d'agents de contrôle indépendants, qui garantissent l'équilibre et l'exemption indispensables. Il existe un risque, non négligeable, que des systèmes de certification mal conçus servent comme barrières commerciales additionnelles et agissent comme mesures protectionnistes, restreignant l'espace des alternatives effectivement durables, et privilégiant les bioénergies inefficaces. Une autre préoccupation du côté des producteurs est le coût des systèmes de certification, qui peut rendre non viable la production sur une petite échelle.

On trouvera ci-après les principaux efforts actuellement en cours pour évaluer et éventuellement pour certifier la durabilité des biocarburants (GBEP, 2007) :

- En janvier 2007, la Commission Européenne a établi comme objectif (non-obligatoire) l'introduction, d'ici à 2020, d'une teneur de 10% de biocarburants (éthanol et biodiesel) dans les combustibles utilisés pour le transport dans chaque pays membre, et un système d'évaluation de la durabilité, actuellement en développement, sera rendu obligatoire.

- En plus de l'exigence d'une teneur de 5% de combustible d'origine renouvelable dans tout combustible pour automobile vendu au Royaume-Uni en 2010, comme défini dans la Renewable Transport Fuel Obligation (RTFO), les producteurs de biocarburant devront faire un rapport sur le bilan de gaz à effet de serre et l'impact environnemental de leurs produits (The House of Commons, 2008).
- En Hollande, c'est en 2006 que commença le développement de critères de durabilité pour la bioénergie, avec des activités en cours pour tester ces critères en des projets-pilote et définir les systèmes de surveillance et de certification. Un exercice global sur les indicateurs possibles présente un jugement favorable au bioéthanol produit au Brésil, en particulier dans l'État de São Paulo [Smeets et al. (2006)].
- En Allemagne, on a révisé récemment la législation d'encouragement aux biocarburants, y compris les exigences obligatoires d'observation des critères de durabilité, sur base de la matière première, de la protection de l'habitat naturel et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Dans le cadre du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (Unep), une discussion est en cours au sujet de la définition de critères de durabilité pour les biocarburants, en suggérant d'adopter des objectifs concrets et des instruments pour leur mise en oeuvre. Dans ce sens, l'Unep travaille en étroite collaboration avec des institutions gouvernementales, des entités privées et des représentants de la société civile, dont notamment le Global Bioenergy Partnership et la Roundtable on Sustainable Biofuels, commentés plus loin [Unep (2008)].
- L'Organisation des Nations Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation (FAO) développe actuellement le projet « Sécurité Alimentaire et Bioénergie » (Bioenergy and Food Security), dans le but d'établir un ensemble analytique de données pour l'évaluation des impacts sur l'approvisionnement en aliments déterminés par l'expansion de la production de bioénergie, considérant les systèmes basés sur les produits alimentaires et ceux dénommés systèmes bioénergétiques de seconde génération [BFS/FAO (2008)].
- La FAO et l'Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel, (Unido) préparent un projet pour le Fonds Global pour l'Environnement (Global Environment Facility – GEF), en vue d'orienter les pays quant aux conditions environnementales et socio-économiques pour la production, la conversion et l'utilisation durables de biocarburants.
- La Table Ronde sur les Biocarburants Durables (Roundtable on Sustainable Biofuels – RSB), dirigée par le Centre d'Énergie de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, en Suisse, est une initiative internationale qui réunit des agriculteurs, des entreprises, des organisations non gouvernementales, des spécialistes, des agences

internationales et de gouvernements intéressés à garantir la durabilité de la production et de la conversion des biocarburants. Dans ce sens, elle promeut une série de réunions, de téléconférences et de débats cherchant à construire un consensus autour des principes et des critères dans la production de biocarburants durables. Les principes retenus pour l'évaluation de la durabilité dans la production des biocarburants sont disponibles pour analyse [Frie et al. (2006) et EPFL (2008)].

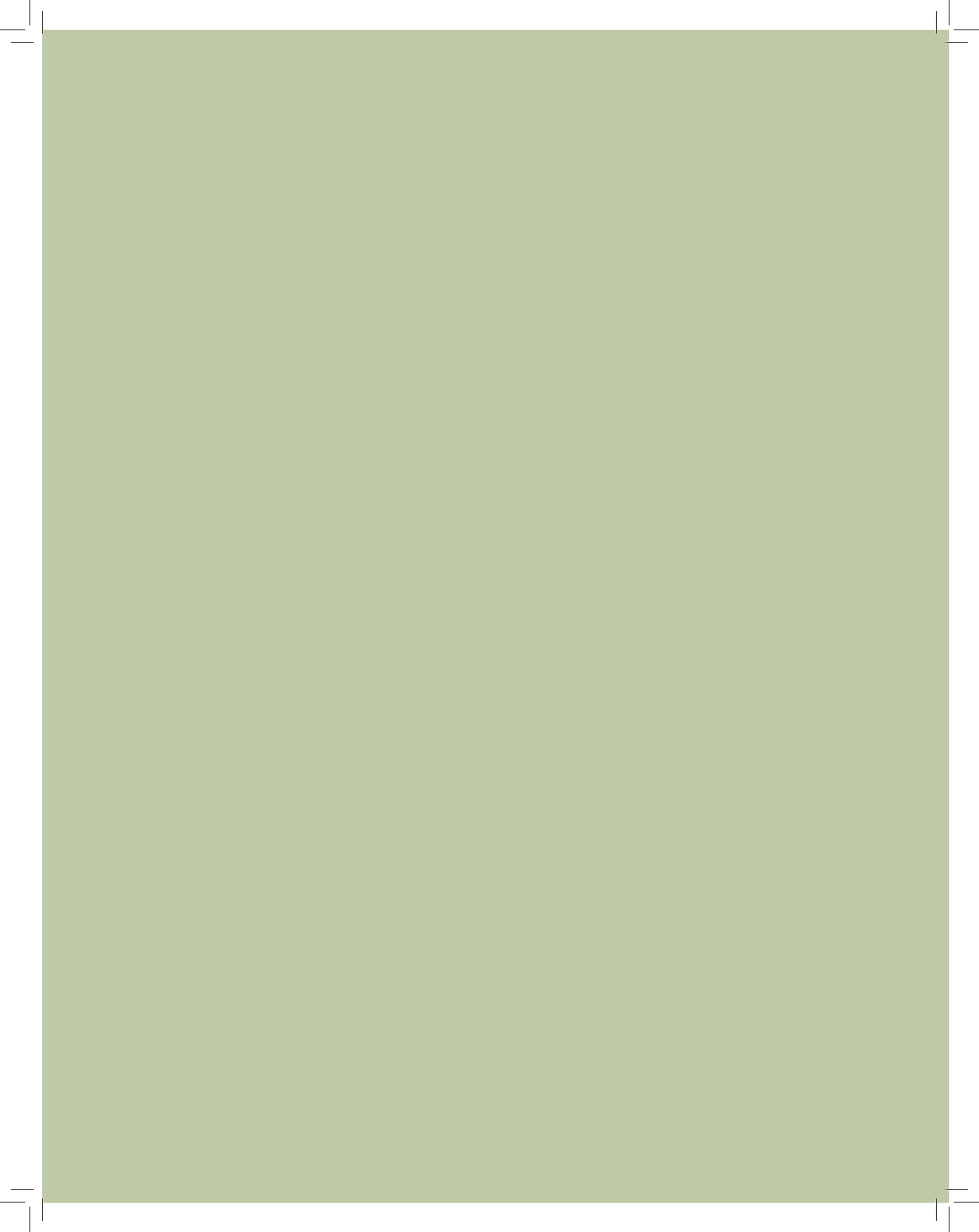
- Le groupe de travail international IEA Task 40, dans le cadre de l'Accord de Bioénergie de l'Agence Internationale de l'Énergie, développe des activités centrées sur le commerce international de biomasse et de bioénergie, leurs implications et leurs perspectives, en travaillant spécifiquement au développement de systèmes de certification, de standardisation et de terminologie pour la promotion du commerce international de vecteurs bioénergétiques sur des bases durables, fournissant une analyse et des informations importantes sur les efforts en cours dans ce domaine [IEA Bioenergy (2008)].
- Les gouvernements du Brésil, des États-Unis et de l'Union Européenne, principaux producteurs mondiaux de biocarburants et membres du Forum International des Biocarburants (International Biofuels Forum – IBF), ont divulgué en février 2008 le Livre blanc sur les spécifications de biocarburants compatibles internationalement, avec une analyse des spécifications actuelles, conduite par un groupe international de spécialistes dans le but de faciliter l'expansion du commerce de ces produits. Les efforts initiaux vont dans le sens de développer des procédures, des systèmes et des matériels de référence pour les tests de qualité en bioéthanol et biodiesel, et même pour permettre, au moyen de méthodes analytiques, de déterminer si un combustible provient de sources renouvelables [NIST (2008)].

Le secteur privé dans le domaine des combustibles, spécialement en Europe, considère la durabilité comme un facteur important dans le développement de la bioénergie, et quelques entreprises développent des procédures propres qui garantissent l'acquisition de produits durables. Cependant, la majeure partie des entreprises intéressées à acquérir et à vendre des biocarburants durables cherche à s'impliquer dans les processus avec une participation d'avantage diversifiée, vue comme plus légitime par les consommateurs. Comme exemple, BP, DuPont, Petrobras et d'autres grandes entreprises participent à la Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB). Dans le domaine d'autres produits d'origine agricole, des systèmes de certification des aspects de durabilité analogues ont été implantés également, comme par exemple pour le bois, le soja et l'huile de palme.

Comme dernière initiative à citer, destinée à garantir les modèles de durabilité dans la production de bioéthanol, le Protocole Agro-Environnemental, signé en 2006 par le gouvernement de l'État de São Paulo et l'Unica, a mis en oeuvre le Programme Bioéthanol Vert pour encourager les bonnes pratiques du secteur du sucre et de l'alcool au moyen d'un certificat de conformité, et pour déterminer un protocole standard à suivre par les producteurs. En phase

de mise en opération et en application sur une large échelle dans tout l'état, l'instrument couvre quelques-uns des principaux points de réduction d'impacts de la culture, comme l'anticipation des délais d'élimination du brûlage de la paille de la canne, la protection des sources et des forêts restantes, le contrôle des érosions et de la gestion adéquate des emballages d'agrototoxiques [Lucon (2008)].

Les systèmes de certification de la durabilité avec ce profil, s'ils sont conçus de manière adéquate et bien mis en oeuvre, pourront servir comme instruments effectifs pour que la production des biocarburants se développe à un niveau souhaitable de rationalité, démontrant ainsi que le bioéthanol de canne à sucre peut atteindre ce niveau, de manière compétitive.





Chapitre 8

Perspectives pour un marché mondial des biocarburants

Divers pays ont montré de l'intérêt pour le développement de la production et de l'utilisation du bioéthanol. Outre de chercher à satisfaire leurs propres besoins énergétiques leur but est, dans beaucoup de cas, de participer à constituer un marché mondial pour ce biocarburant. entre les pays pouvant le produire de manière durable et les pays importateurs potentiels, au bénéfice des deux parties. Actuellement, un tel marché n'en est encore qu'à ses débuts, mais les demandes croissantes en un combustible renouvelable et environnementalement correct, associées au potentiel offert par le bioéthanol de canne à sucre pour répondre aux critères objectifs de durabilité, attestent de l'existence de perspectives intéressantes. Le présent chapitre présente les conditions nécessaires pour que le bioéthanol devienne un produit mondialisé, sur la base de son offre et de sa demande actuelles et futures. Il présente aussi les politiques et les évolutions en rapport avec sa production et sa commercialisation.

Bien que cette discussion soit focalisée habituellement sur le bioéthanol, l'analyse présente portera sur le contexte général des biocarburants, et inclura notamment quelques informations sur le biodiesel. Initialement sera présentée une estimation du potentiel de la production bioénergétique, suivie d'une révision des données actuelles et prospectives pour l'offre et la demande de bioéthanol, et enfin du contexte des politiques et des stratégies tournées vers la production et l'utilisation de biocarburants, thèmes fondamentaux pour que les potentiels mentionnés et les attentes des marchés se réalisent. Ce chapitre sera conclu par l'analyse des interrelations entre la sécurité alimentaire et la production de biocarburants, et par un commentaire sur les facteurs favorisant un marché global du bioéthanol, en rapport avec les défis environnementaux et avec le renforcement du commerce international des produits agricoles.



8.1 Potentiel global pour la production de biocarburants

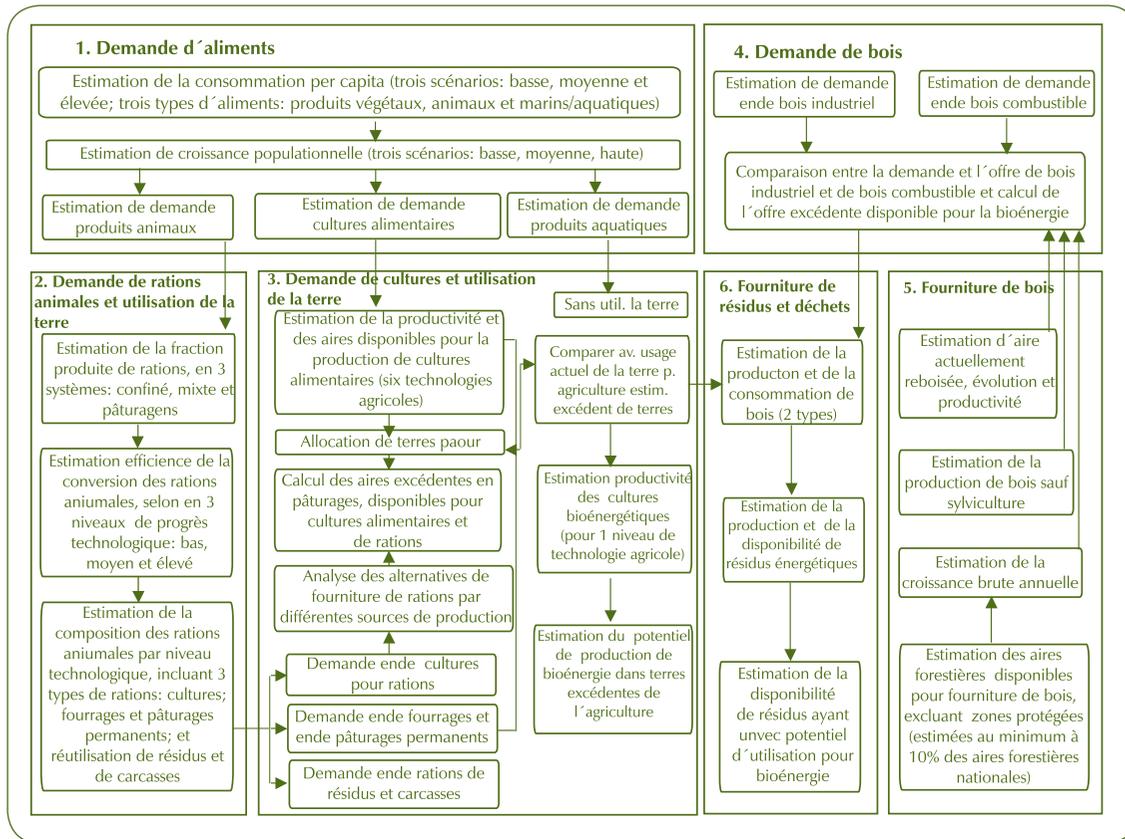
Diverses études ont été menées pour faire la lumière sur l'un des principaux thèmes conditionnant l'avenir des biocarburants et du bioéthanol en particulier : en quelle quantité et où pourraient-ils être disponibles? Il n'est pas simple de répondre à cette question, étant donné que l'offre potentielle en biocarburants n'est pas une donnée absolue et statique, comme une réserve en un minerai, mais une estimation dynamique, qui dépend de scénarios géographiques, économiques et politiques évolutifs, et aussi de technologies de production et de transformation, nombre d'entre elles encore en développement. Par exemple, si les propositions de production de biodiesel à base d'algues marines se concrétisent, comment estimer leur potentiel de production?

De plus, les ressources naturelles consacrées aux cultures énergétiques, comme les terres et l'eau, sont nécessairement limitées et doivent aussi être partagées avec la production d'aliments pour les personnes et les animaux, les intrants industriels (fibres textiles, bois pour la cellulose et autres finalités, etc.), la protection de la nature, parmi tant d'autres usages variés. En particulier, la complexité de cette thématique amplifie sa relation propre avec l'offre d'aliments, d'où l'importance de connaître le potentiel durable de la production, de la transformation et de l'utilisation de biocarburants, eu égard aux préoccupations de sécurité alimentaire.

Etablir des limites et des frontières à la production de biocarburants et surtout, prendre en considération les critères de durabilité, sont donc des entreprises complexes. Pour y faire face, nous verrons dans ce chapitre qu'on a développé des modèles analytiques et informatiques capables de modéliser et de simuler des impacts, permettant ainsi d'évaluer les politiques et d'offrir aux preneurs de décision un outil de dimensionnement des programmes bioénergétiques. Une représentation de l'ample réseau d'interdépendance à prendre en considération parmi les demandes agricoles et forestières et les bioénergies, suivant le modèle suggéré par la FAO, est présentée à la Figure 30.

Des études préliminaires sur la disponibilité en biomasse [Berndes et al. (2003)] ont conclu que la contribution possible de la biomasse à l'avenir de l'offre globale d'énergie pourra varier entre, environ, 100 EJ/an et 400 EJ/an en 2050, ce qui représente de 21% à 85% de la consommation actuelle totale d'énergie sur la planète, estimée à 470 EJ. Les interactions entre le secteur bioénergétique en expansion et les autres utilisations de la terre, comme la production d'aliments, la protection de la biodiversité, la conservation du sol et de la nature et la séquestration de carbone, ont été évaluées récemment par quelques études.

Figure 30 – Vue générale des principaux éléments utilisés dans la méthodologie d'évaluation du potentiel bioénergétique



Source : Smeets et al. (2006).

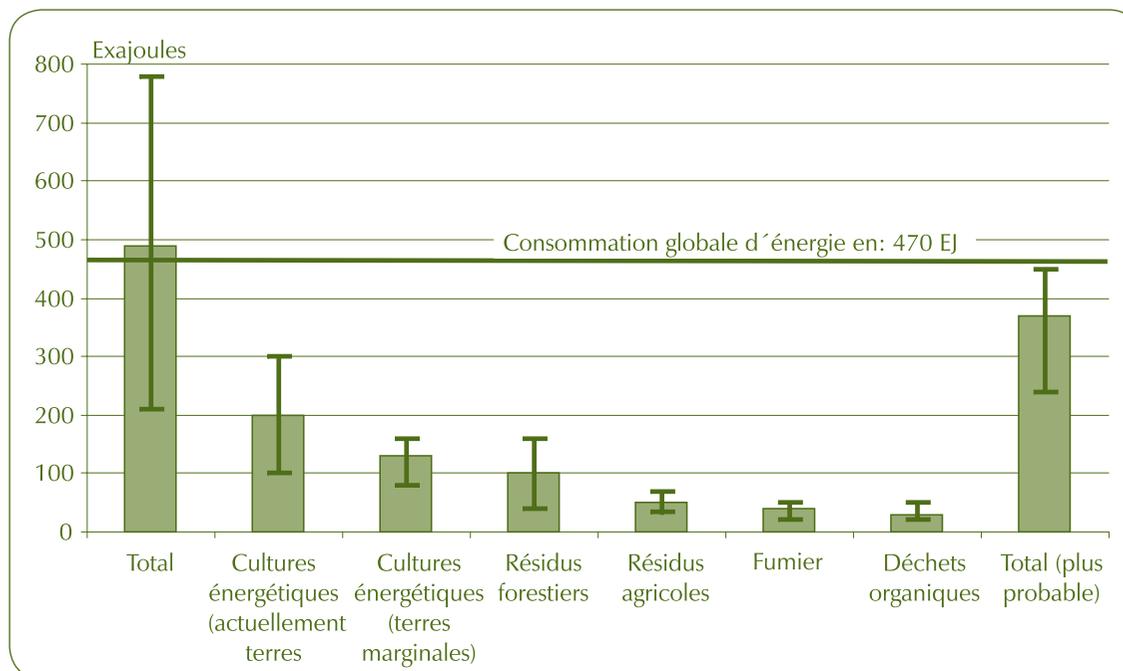
L'une des plus connues utilise une approche *bottom-up* pour traiter les informations disponibles sur l'utilisation de la terre, sur les systèmes de production agricole, sur les projections de la demande en aliments et sur les progrès possibles en matière de gestion agricole (tant pour les cultures que pour la production de viande et de produits laitiers) [Smeets et al. (2006)]. En répartissant l'utilisation de la biomasse pour l'énergie en trois catégories – plantations énergétiques sur les terres cultivables ; production de biomasse sur des terres marginales ; résidus d'agriculture et de sylviculture, fumier et autres résidus organiques [Junginger et al. (2007)] – et selon l'approche décrite à la Figure 30, il est estimé que ces catégories peuvent, globalement, fournir 200 EJ, 100 EJ et 100 EJ, respectivement, ce qui correspondrait à la limite supérieure indiquée antérieurement, soit 400 EJ.

Il n'est pas aisé de déterminer une valeur qui représente le potentiel global de production de biocombustibles. C'est ainsi que le Graphique 36 présente des fourchettes de variations de l'offre de biomasse à des fins énergétiques, résultant de diverses approches et méthodes.

Pour le potentiel total global, la variation va de 205 EJ à 790 EJ [Juergens (2007)]. Dans cette figure est représentée aussi la demande globale d'énergie estimée pour 2007. La principale raison des variations observées entre les limites supérieures et inférieures est le haut degré d'incertitude existant sur les deux paramètres les plus déterminants pour ces évaluations du potentiel : la disponibilité en terre et les niveaux de productivité. En outre, les hypothèses d'offre future de biomasse provenant de forêts et de résidus agricoles et de la sylviculture varient de manière significative d'une étude à l'autre, comme cela sera abordé ci après en détail.

Le Tableau 35 affiche une évaluation du potentiel technique des biocarburants, sur la base de quatre systèmes de production agricole hypothétiques, en considérant essentiellement les cultures énergétiques et les résidus agricoles et ceux de la sylviculture. Cette évaluation ne tient pas compte du suif ni d'autres sous-produits gras ayant un potentiel énergétique. Contrainte importante, aucun des scénarios étudiés ne permet qu'apparaisse de carence en aliments. Concernant la demande alimentaire, les modèles de ces études ont utilisé, comme référence de base, les données nationales publiées au Bilan Alimentaire de la FAOSTAT (Food Balance Sheets – FBS) [FAO (2003)].

Graphique 36 – Potentiel bioénergétique par type de biomasse



Source : Juergens (2007).

Tableau 35 – Potentiel total technique de production de bioénergie pour diverses régions et scénarios de production en 2050 (EJ par an)

| Région | Scénario de production | | | |
|--|------------------------|-----|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Amérique Latine et Caraïbes | 89 | 162 | 234 | 281 |
| Amérique du Nord | 39 | 75 | 168 | 204 |
| Afrique Subsaharienne | 49 | 117 | 282 | 347 |
| Nord de l’Afrique et Moyen Orient | 2 | 2 | 31 | 39 |
| Europe Occidentale | 13 | 19 | 25 | 30 |
| Europe de l’Est | 5 | 13 | 24 | 29 |
| Communauté des États Indépendants (CEI) et pays baltes | 83 | 111 | 223 | 269 |
| Inde et Sud Asiatique | 23 | 26 | 31 | 37 |
| Asie Orientale | 22 | 28 | 158 | 194 |
| Japon | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Océanie | 40 | 55 | 93 | 114 |
| Total | 367 | 610 | 1.273 | 1.548 |

Source : Smeets et al. (2006).

Au Tableau 35, les scénarios pris en considération pour les systèmes de production 1 à 3 ont en commun d’être basés sur des hypothèses de croissance moyenne de la population humaine globale entre 1998 et 2050 (de 5,9 milliards à 8,8 milliards de personnes) et sur une évolution de la consommation moyenne d’aliments *per capita* (de 2,8 Mcal à 3,2 Mcal par personne par jour), avec des perspectives d’établissement de vastes plantations (de 123 millions à 284 millions d’ha) et un niveau technologique élevé pour la production des cultures énergétiques. Avec les mêmes scénarios pour la demande, le scénario 4 incorpore lui l’hypothèse que les efforts de recherche et de développement pourraient augmenter les récoltes au-delà du palier technologique utilisé au scénario 3, avec comme résultat des récoltes de 25% supérieures en raison des progrès technologiques. C’est le système de production agricole qui détermine les exigences de terrains pour la culture d’aliments, y compris les exigences pour l’alimentation animale et, par conséquent, le volume de résidus de récolte à produire. Dans ce cas particulier, le scénario 3 se base sur un système d’élevage d’animaux sans utilisation de pâturages, dans lequel toute l’alimentation animale provient des cultures et des résidus agricoles. Les scénarios 1 et 2 se basent sur un système de production mixte, dans lequel une grande partie de l’alimentation animale provient des pâturages. La production de résidus de récoltes à partir de cultures destinées à l’alimentation humaine et animale est, par conséquent, le facteur le plus important dans ce système 3. Les petites différences

entre la production de résidus dans les systèmes 1 et 2 sont causées par les différences dans l'allocation de production des cultures. Le système de production détermine aussi le niveau de progrès de la technologie agricole et, par conséquent, influence la fraction provenant des résidus de récoltes.

Cette étude a permis de constater que le principal potentiel pour la production de cultures énergétiques se trouve en Afrique Subsaharienne et dans la région de l'Amérique Latine et des Caraïbes, qui atteignent, dans le scénario productif 4, des productions annuelles de 317 EJ et 281 EJ, respectivement. Les deux régions possèdent des terres agricoles non utilisées et adaptées, du point de vue écologique, à la production de cultures énergétiques, en particulier la canne à sucre. L'Asie Orientale a aussi un potentiel considérable pour la production de cultures, de 147 EJ annuels dans le scénario productif 4. Parmi les pays industrialisés, la région de la Communauté des Etats Indépendants et des nations baltes, l'Amérique du Nord et l'Océanie, présentent les potentiels les plus significatifs. Les régions arides, avec des terres moins productives ou des limitations de superficie, comme le Japon, l'Asie Méridionale et le Nord de l'Afrique et le Moyen Orient, ont un potentiel nulle ou très réduit. L'impact de la technologie adoptée pour la production animale sur les disponibilités de terres agricoles pour le développement des biocarburants est assez important pour l'Amérique Latine, comme le montrent les scénarios de production évalués, étant donné que les produits comme la viande, le lait et les oeufs sont beaucoup plus intensifs par rapport à l'usage de la terre par unité de produit, que la production agricole [FAO (2003)].

Les résultats de ces études sont assez optimistes en ce qui concerne l'impact de la production bioénergétique sur la production d'aliments. Une conclusion importante est que, sans affecter la production alimentaire d'ici à 2050, le potentiel global total de bioénergie produite annuellement, estimé pour cette année, correspondrait à 78%, 129%, 270% et 329% de la demande énergétique observée en 2005, respectivement pour les scénarios de production 1 à 4. La majeure partie de ce potentiel est produite par des cultures énergétiques spécialisées, développées sur des terres agricoles excédantes, qui ne seraient pas nécessaires pour assurer la production d'aliments. Répétons que la disponibilité de terres agricoles excédantes dans les divers systèmes dépend principalement de l'efficacité avec laquelle les aliments d'origine animale sont produits. Dans ces potentiels, les résidus, y compris les déchets urbains, sont responsables de 76 EJ à 96 EJ par an. Les auteurs citent d'autres estimations publiées dans la littérature scientifique [Hoogwijk et al. (2003) et Wolf et al. (2003)], qui confirment les résultats atteints.

Une condition préalable pour atteindre les niveaux de production de cultures énergétiques estimés aux paragraphes antérieurs est l'introduction de systèmes avancés de production agricole, avec une utilisation renforcée d'intrants, comme les fertilisants et les pesticides, et surtout l'optimisation des récoltes. Grâce à ces progrès, de 15% à 72% de la superficie agricole utilisée pourraient être libérés et rendus disponibles pour la production de cultures énergétiques dans les systèmes 1 et 4, respectivement.

Le Tableau 36 montre le potentiel global de production de bioénergie, en indiquant les conditions générales pour atteindre de tels niveaux de production. Dans ce tableau, pour chaque système de production, sont fournies deux intervalles de variation pour le potentiel bioénergétique : a) selon des hypothèses pessimistes, avec un accès limité aux terres de culture ; et b) et selon des hypothèses optimistes, considérant une demande élevée en bioénergie. Une limite inférieure égale à zéro signifie que le potentiel disponible peut être nul, au cas où l'on ne réussirait pas à moderniser l'agriculture, en imposant une plus grande demande de terres pour alimenter l'humanité.

Pour le cas particulier des biomatériaux, le potentiel bioénergétique associé pourrait même être négatif, car une demande élevée en biomasse pour la fabrication de produits tels que les bioplastiques ou des matériaux de construction peut réduire la disponibilité de biomasse pour la production d'énergie. Cependant, l'utilisation accrue des biomatériaux, entrainera une disponibilité accrue de sous-produits et de déchets, à la fin du cycle de vie de ces produits, qui peuvent être utilisés pour la production d'énergie. Une telle utilisation de biomasse aura pour résultat un bénéfice « double » par rapport aux gaz à effet de serre, en évitant les émissions liées à la fabrication de matériaux au moyen de combustibles fossiles et grâce à la production d'énergie. L'offre annuelle d'énergie provenant de biomatériaux en fin de vie (déchets) peut varier de 0 EJ à 50 EJ. Cet intervalle de variation exclut les effets en cascade (utilisations successives) et ne tient pas compte du déphasage entre la production du matériau et son utilisation finale comme combustible [Hookwijk et al. (2003)].

En ce qui concerne l'utilisation de la terre et son impact sur la disponibilité en terres pour l'agriculture, un rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie [IEA Bioenergy (2007)] retient comme réaliste l'hypothèse que la contribution actuelle de la bioénergie de 40 EJ à 55 EJ par an augmentera considérablement, et qu'est attendu pour ce siècle un apport annuel de 200 EJ à 400 EJ. Sur base de données généralement acceptées, ce rapport observe qu'un tiers de cette énergie pourrait être fourni par les résidus et les ordures, un quart par la régénération de terres dégradées ou marginales, et le restant par des terres cultivables et des pâturages actuels. Presqu'un milliard d'hectares dans le monde pourraient ainsi être utilisés dans la production de biomasse à des fins énergétiques, y compris 400 millions d'hectares de terres cultivables et de pâturages, et une aire plus étendue encore de terres marginales et dégradées, ce qui représente environ 7% de la superficie terrestre et moins de 20% de la terre utilisée actuellement pour la production agricole.

D'autres rapports [Best et al. (2008)] indiquent que, des 13,2 milliards d'hectares de superficie mondiale de terres, 1,5 milliard d'hectares sont utilisés pour produire des cultures et 3,5 milliards sont utilisés pour l'élevage de bétail à viande, de vaches laitières et pour la production de laine. Les cultures utilisées actuellement dans le but spécifique de production de biocarburants, résultat du choix des agriculteurs, utilisent à peine 0,025 milliard d'hectares. Au Brésil, par exemple, plus de la moitié de la demande totale d'essence est fournie par l'éthanol produit sur 1% des 320 millions d'hectares de terres cultivables et des pâturages, aucune de ces terres n'étant située dans la région amazonienne.

Tableau 36 – Potentiel de diverses matières-premières et systèmes productifs pour la bioénergie

| Contexte de production de bioénergie | Principales hypothèses et observations | Offre potentielle bioénergétique jusque 2050 (EJ/an) | |
|---|---|--|-----------|
| | | Pessimiste | Optimiste |
| Production d'énergie en terres cultivables actuellement | Superficie requise – pessimiste : 0 Gha à 4 Gha ; optimiste : 1 Gha à 2 Gha. Une production bioénergétique élevée exige l'adaptation structurelle des systèmes de production agricole. Est supposée une productivité annuelle de 8 t à 12 t de biomasse sèche /ha, avec des espérances de productivité plus grande sur des sols plus fertiles | 0 a 700 | 100 a 300 |
| Production de biomasse en terres marginales | Sur une échelle globale, la superficie maximum à utiliser serait de 1,7 Gha, avec basse productivité, 2 t à 5 t de biomasse sèche/ha.an (38 GJ/ha.an à 95 GJ/ha.an). L'offre peut être limitée par un rendement économique faible ou par la compétition avec la production d'aliments | 0 a 150 | 60 a 150 |
| Biomatériaux | Aire de culture nécessaire pour répondre à la demande globale de biomatériaux : 0,2 Gha à 0,8 Gha (productivité moyenne : 5 t de biomasse sèche/ha.an). Si les terres marginales et la sylviculture sont capables de répondre à cette demande, la demande de terres cultivable sera nulle | 0 a 150 | 40 a 150 |
| Résidus agricoles | Estimations tirées de diverses études. Le potentiel dépend d'indices de production et du type de système de production : les systèmes intensifs permettent une meilleure utilisation de résidus que les systèmes extensifs. | 15 a 70 | |
| Résidus forestiers | Le potentiel bioénergétique durable des forêts du monde est peu connu. La valeur supérieure est attribuée au potentiel technique, qui inclut les résidus de traitement. | 0 a 150 | 30 a 150 |
| Fumier | Utilisation de fumier sec. Estimation basée sur l'utilisation actuelle et estimation supérieure basée sur le potentiel technique. L'utilisation à long terme est incertaine. | 0 a 55 | 5 a 55 |
| Déchets organiques | Estimation basée sur les données de la littérature. Dépend fortement du développement économique, de la consommation et de l'utilisation de biomatériaux. Les chiffres incluent la fraction organique des déchets urbains et les restes de bois. Des valeurs plus élevées sont possibles avec un usage plus intensif des biomatériaux | 5 a 50 | |
| Total | Dans le scénario le plus pessimiste il n'y a pas de disponibilité de terres pour la production d'énergie, seuls les résidus sont pris en considération. Dans le scénario plus optimiste, l'agriculture intensive utilise des sols de haute qualité | 40 a 1.100 | 250 a 500 |

Source : Berndes (2003) e Smeets (2006).

Il est intéressant d'observer que, outre la production de biocarburants, les cultures utilisées pour la production d'énergie fournissent aussi fréquemment des sous-produits, tels que du fourrage animal, des fertilisants et de la bioélectricité, dans des volumes significatifs. C'est ainsi qu'a été présentée, aux chapitres antérieurs, la diversité des co-produits de la canne à sucre, obtenus simultanément au bioéthanol, dans les conditions actuelles et envisagées.

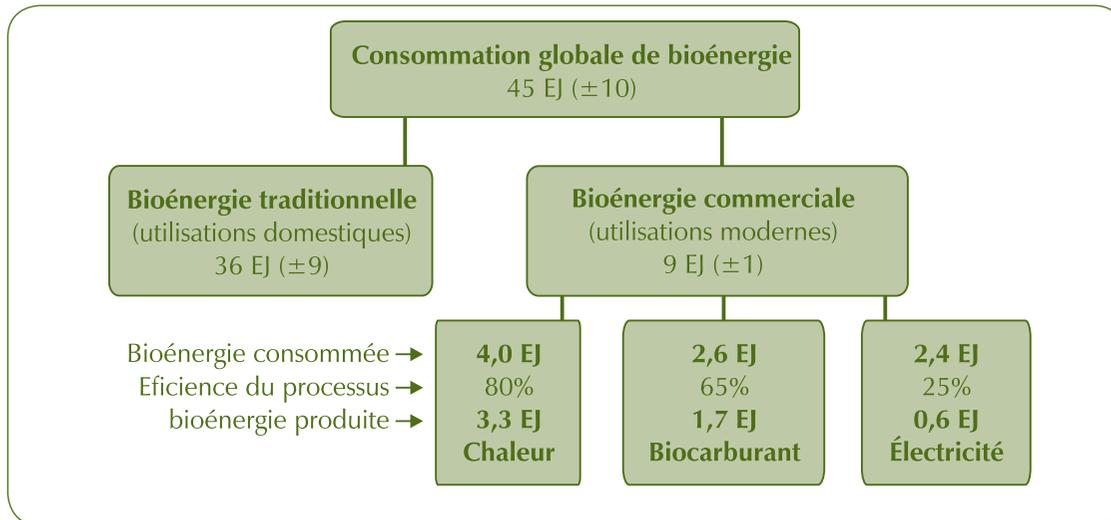
Pour conclure, bien que les méthodologies et les outils pour l'évaluation détaillée du potentiel global de production durable de biocarburants soient encore en phase de développement, et bien que les données sur la disponibilité de biomasse à des fins énergétiques ne sont pas disponibles dans beaucoup de pays, il est possible d'affirmer qu'existe, à l'échelle mondiale, un potentiel bioénergétique important et inexploité. Il est de plus possible d'identifier trois conclusions préliminaires importantes : a) l'offre potentielle en bioénergie dépend fortement des modèles de production d'aliments, en particulier des terres dédiées aux élevages d'animaux ; b) certaines régions disposent d'un avantage comparatif évident ; et c) le potentiel total disponible est, sous des hypothèses optimistes, de la même magnitude que la demande énergétique globale. Les paragraphes ci-après ont pour but de montrer comment ce potentiel peut être réalisé.

8.2 Offre et demande en biocarburants : situation actuelle

Les biocarburants peuvent effectivement apporter une contribution essentielle à la demande globale en énergie. La majorité des pays possède un certain niveau de ressources potentielles en bioénergie, ce qui en fait l'une des alternatives d'offre énergétique les plus répandues dans l'actualité. La bioénergie correspond aussi à l'unique source renouvelable d'énergie qui, que ce soit comme biocarburant solide, liquide ou gazeux, peut être utilisée pour servir à une large gamme d'applications : production d'électricité, fourniture de chaleur aux industries et aux résidences, et combustible de véhicules automobiles. Sont présentées ci-après des données sur la contribution actuelle des biocarburants à la matrice énergétique mondiale, en considérant les principaux marchés, et les conditions particulières d'offre pour le bioéthanol.

À l'échelle globale, la Figure 31 montre la contribution de la biomasse à l'offre primaire et secondaire (après les conversions en autres formes énergétiques) en 2007. Parmi les sources de chaleur, il faut citer le bois de chauffage et la bagasse de canne ; parmi les biocarburants liquides, le bioéthanol et le biodiesel ; et pour la production d'électricité, le bois de chauffage (notamment comme lixiviant cellulosique dans les fabriques de papier et cellulose) et la bagasse de canne, en considérant également les systèmes de cogénération dans lesquels la chaleur rejetée dans les systèmes thermoélectriques est utilisée dans un processus thermique, avec une économie énergétique sensible.

Figure 31 – Contribution de la bioénergie à l’offre primaire et secondaire d’énergie en 2007



Source : Best et al. (2008).

Les biocarburants liquides, spécialement l'éthanol produit à partir de la canne à sucre et d'excédents de maïs et d'autres céréales et, à une échelle bien plus petite, le biodiesel produit à partir de grains et de palmacées représentent, modestement, 1,7 EJ (environ 1,5%) de l'utilisation de combustibles pour le transport dans le monde. L'intérêt global pour ces biocarburants, qui peuvent être utilisés comme source énergétique pour le transport, est croissant, en particulier en Europe, au Brésil, en Amérique du Nord et en Asie (notamment au Japon, en Chine et en Inde) [IEA (2005)]. La production globale d'éthanol a plus que doublé depuis 2000, tandis que la production de biodiesel, partant d'une base bien plus petite, a presque triplé durant cette période. D'autre part, la production de pétrole a augmenté de 7% à peine depuis 2000 et elle devrait probablement atteindre sa production maximum d'ici quelques années, selon divers analystes. Ainsi, face à ce tableau de stagnation relative de la production pétrolière, les biocarburants ont montré une expansion vigoureuse : en 2007, la production d'éthanol et de biodiesel atteignit 43% de plus que la production observée en 2005. À ces niveaux, la production d'éthanol en 2007 représentait environ 4% des 1.300 milliards de litres d'essence consommés annuellement dans le monde entier [WWI (2007)].

Il est intéressant de noter qu'en 2006, les biocarburants liquides ont été responsables d'un peu plus de 1% de l'énergie mondiale renouvelable et un peu moins de 1% de l'offre annuelle de pétrole brut, évaluée à 4.800 milliards de litres (approximativement 83 millions de barils par jour). Ce scénario change très rapidement dans la majorité des grands pays consommateurs d'énergie, qui adoptent des politiques en vue d'une utilisation plus large des biocarburants au cours de la prochaine décennie [ESMAP (2005)]. Sur base du lieu de production et de la matière première utilisée, les biocarburants liquides importants actuelle-

ment peuvent être classés, *grosso modo*, en quelques de types : bioéthanol de canne à sucre (au Brésil), bioéthanol de maïs (aux EUA) et biodiesel de colza (en Allemagne), et au second plan, le bioéthanol de betterave et de blé (en Europe). La production de biocarburants est encore concentrée dans quelques pays : ces dernières années le Brésil et les États-Unis ont produit, ensemble, 90% de l'éthanol, tandis que l'Allemagne fut responsable de 50% de la production mondiale de biodiesel [Martinot (2008)].

Une étude réalisée par le Partenariat Global de Bioénergie [GBEP (2007)] a évalué les tendances des biocarburants dans le groupe des pays G8+5, dont font partie quelques-uns des pays les plus actifs sur le scénario bioénergétique, que ce soit comme producteurs ou utilisateurs, exportateurs ou importateurs. En plus des pays du G8 (Canada, France, Allemagne, Italie, Japon, Russie, Royaume Uni et États-Unis), cinq autres pays furent inclus (« pays +5 ») : Afrique du Sud, Brésil, Chine, Inde et Mexique. Sur base de cette étude, le Tableau 37 présente la contribution de la bioénergie dans l'offre totale d'énergie primaire (*total primary energy supply* – TPES), globalement équivalente à la production énergétique nationale ajoutée aux importations, les exportations étant exclues. La Chine, avec 9.000 PJ par an, est le principal utilisateur de bioénergie, suivie de l'Inde, avec 6.000 PJ, des États-Unis, avec 2.300 PJ, et du Brésil, avec 2.000 PJ de demande annuelle, tandis qu'au Canada, en France et en Allemagne, la contribution de la bioénergie est d'environ 450 PJ annuels. L'évolution, au long des dernières années, indique que la demande en biocarburants tend à augmenter à un rythme élevé au Brésil, en Allemagne, en Italie et au Royaume Uni, tandis qu'en France, au Japon, en Inde et au Mexique, elle tend à se maintenir stable.

Tableau 37 – Les biocarburants dans l'offre d'énergie totale primaire (En PJ)

| Pays | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Canada | 409 | 408 | 418 | 437 | 480 | 481 | 451 | 487 | 489 | 510 | 525 |
| France | 440 | 467 | 438 | 453 | 439 | 430 | 437 | 406 | 420 | 419 | 422 |
| Allemagne | 139 | 143 | 195 | 210 | 207 | 229 | 246 | 271 | 312 | 348 | 441 |
| Italie | 52 | 51 | 59 | 63 | 69 | 74 | 79 | 76 | 81 | 121 | 123 |
| Japon | 191 | 193 | 199 | 183 | 190 | 196 | 180 | 187 | 191 | 190 | 198 |
| Russie | 259 | 221 | 190 | 157 | 208 | 163 | 158 | 151 | 149 | 143 | 146 |
| Royaume Uni | 52 | 54 | 57 | 55 | 56 | 61 | 64 | 70 | 82 | 96 | 115 |
| États-Unis | 2.554 | 2.607 | 2.531 | 2.601 | 2.507 | 2.551 | 2.285 | 2.256 | 2.474 | 2.633 | 2.697 |
| Pays du G8 | 4.097 | 4.144 | 4.086 | 4.160 | 4.156 | 4.186 | 3.900 | 3.904 | 4.198 | 4.460 | 4.666 |
| Brésil | 1.728 | 1.706 | 1.719 | 1.756 | 1.838 | 1.794 | 1.823 | 1.951 | 2.110 | 2.277 | 2.801 |
| Chine | 8.610 | 8.656 | 8.703 | 8.750 | 8.906 | 8.973 | 9.053 | 9.127 | 9.202 | 9.277 | 9.360 |
| Inde | 5.862 | 5.918 | 5.978 | 6.039 | 6.144 | 6.230 | 6.313 | 6.389 | 6.464 | 6.539 | 6.620 |
| Mexique | 328 | 329 | 338 | 343 | 337 | 333 | 337 | 333 | 336 | 337 | 348 |
| Afrique du Sud | 479 | 487 | 495 | 504 | 516 | 529 | 539 | 545 | 551 | 547 | 564 |
| Pays +5 | 17.006 | 17.095 | 17.233 | 17.392 | 17.741 | 17.859 | 18.064 | 18.345 | 18.662 | 18.977 | 19.693 |
| Pays G8+5 | 21.103 | 21.239 | 21.319 | 21.552 | 21.897 | 22.045 | 21.964 | 22.249 | 22.860 | 23.437 | 24.359 |

Source : GBEP (2007).

Du point de vue de son importance par rapport aux autres sources énergétiques, le Tableau 38 montre comment a évolué ces dernières années la fraction de la demande totale d'énergie couverte par les biocarburants dans les pays du G8+5, ce qui peut être considéré comme représentatif pour d'autres pays d'Europe, d'Asie et d'Amérique Latine. Dans la majorité des pays africains, ainsi que dans les pays plus pauvres d'autres régions, les données sont bien différentes, étant donné que la demande de bois combustible et d'autres formes traditionnelles de bioénergie, comme les résidus, correspond de façon presque complète aux données de consommation bioénergétique.

La contribution des biocarburants dans la demande totale d'énergie atteint presque 30% au Brésil et en Inde, et 1% seulement au Royaume Uni et en Russie. Dans des pays comme le Canada, la France, l'Allemagne et les États-Unis, cette contribution varie entre 3% et 4%, atteignant près de 20% en Suède et en Finlande. La part couverte par la bioénergie en Inde, en Chine et au Mexique, est en diminution, très probablement à cause de l'augmentation de l'utilisation du kérosène et du GLP dans les résidences. D'autre part, la contribution des biocarburants dans les pays du G8, spécialement en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni, a augmenté à un taux annuel de 4% à 6% ces dernières années.

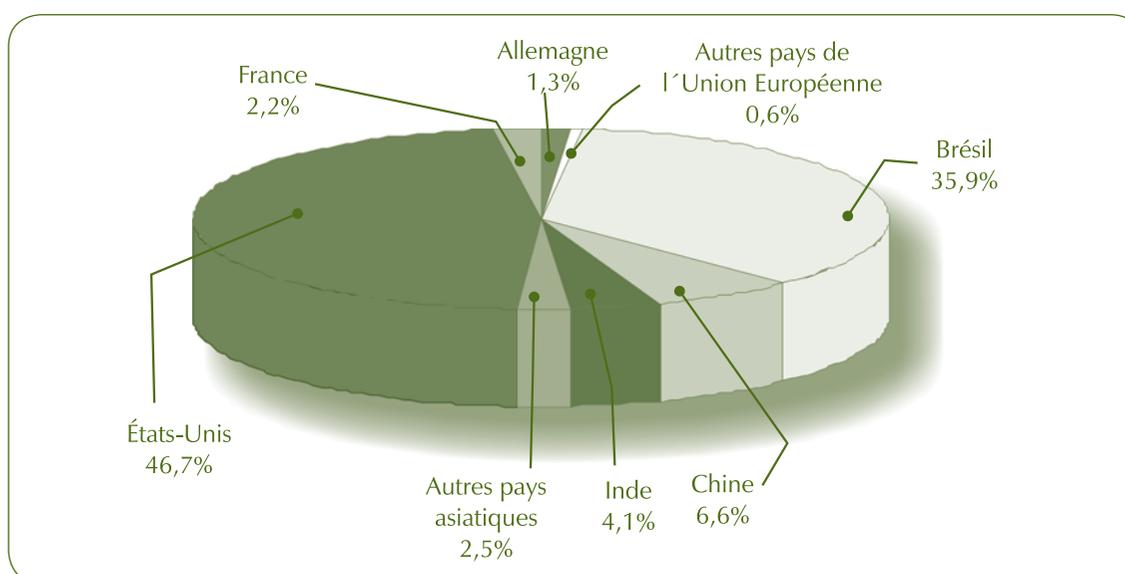
Tableau 38 – Participation relative des biocarburants dans l'offre totale primaire d'énergie
(En %)

| Pays | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Canada | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | 4,6 | 4,4 | 4,7 | 4,5 | 4,5 | 4,6 |
| France | 4,4 | 4,4 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,0 | 3,9 | 3,6 | 3,7 | 3,6 | 3,6 |
| Allemagne | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,6 | 1,7 | 1,9 | 2,1 | 2,4 | 3,1 |
| Italie | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 1,6 | 1,6 |
| Japon | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Russie | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,5 | 0,5 |
| Royaume Uni | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 1,0 | 1,2 |
| États-Unis | 2,9 | 2,9 | 2,8 | 2,8 | 2,7 | 2,6 | 2,4 | 2,4 | 2,6 | 2,7 | 2,8 |
| Pays du G8 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,3 |
| Brésil | 26,6 | 25 | 23,9 | 23,7 | 24,1 | 23,1 | 23,3 | 24,3 | 26 | 26,5 | 29,8 |
| Chine | 19,6 | 19 | 19,1 | 19,2 | 19,4 | 19,4 | 19,6 | 18,2 | 16,2 | 14,0 | 13,0 |
| Inde | 36,1 | 35,3 | 34,3 | 33,9 | 32,5 | 32,4 | 32,3 | 31,9 | 31,5 | 30,0 | 29,4 |
| Mexique | 5,9 | 5,7 | 5,7 | 5,5 | 5,4 | 5,3 | 5,3 | 5,1 | 5,0 | 4,9 | 4,7 |
| Afrique du Sud | 10,9 | 11 | 11,1 | 11,1 | 11,3 | 11,4 | 11,8 | 12,4 | 11,1 | 10,2 | 10,7 |
| Pays +5 | 22,2 | 21,6 | 21,4 | 21,3 | 21,3 | 21,2 | 21,4 | 20,6 | 19,2 | 17,4 | 16,9 |

Source : GBEP (2007).

Les données sur la production de bioéthanol révèlent d'importantes tendances d'expansion et de diversification. En 2006, la production totale de ce biocarburant fut de 51,3 milliards de litres et l'année suivante, elle atteignait 55,7 milliards de litres. En 2007, avec une production de 26 milliards de litres d'éthanol à base de maïs, les Etats-Unis continuèrent comme leaders de la production globale de bioéthanol, et le Brésil, second producteur mondial, a produit cette même année près de 20 milliards de litres de bioéthanol dérivé de la canne à sucre [WWI (2007)]. Comme leaders de la production de bioéthanol en Asie, la Chine et l'Inde ont produit 3,7 milliards et 2,3 milliards de litres en 2007, respectivement. En 2007 également, la production de tous les pays asiatiques atteint 7,4 milliards de litres. Dans l'Union Européenne, la production de bioéthanol est passée de 1,6 milliard de litres en 2006, à près de 2,3 milliards de litres en 2007. Comme principal producteur européen de bioéthanol, la France a produit en 2007 aux alentours de 1,2 milliard de litres, suivie de l'Allemagne avec 850 millions de litres [F. O. Licht (2007)]. Le Graphique 37 résume la participation des principaux producteurs de bioéthanol dans l'offre totale, dans laquelle les pays en développement correspondent à environ la moitié de la production observée.

Graphique 37 – Production d'éthanol en 2007 par régions



Source : Elaboré sur base de WWI (2007) et F. O. Licht (2007).

Il est remarquable de constater que cette répartition a évolué de manière accélérée, avec des taux de croissance élevés chaque année. De fait, les valeurs de la production de bioéthanol présentées dans ce chapitre représentent une petite fraction du potentiel de production existant, qui devra être développé bien d'avantage au cours des prochaines années, comme on l'analysera au paragraphe suivant.

8.3 Projections pour l'offre et la demande en bioéthanol, en 2010–2015

La présente section se concentre sur l'offre et la demande en bioéthanol au début de la prochaine décennie, lorsque le marché de ce biocarburant aura commencé effectivement à se développer. Seront analysées séparément la situation en Amérique du Nord (en excluant le Mexique, traité dans le contexte de l'Amérique Latine), dans l'Union Européenne, en Amérique Latine, aux Caraïbes et en Océanie, en considérant spécialement les pays qui ont déjà mis en oeuvre ou mettront en oeuvre des politiques d'encouragement à la production et à la consommation de biocarburants. Dans leur majeure partie, les chiffres ont été extraits d'études réalisées par le Global Biofuels Center, institution dédiée aux études stratégiques sur les marchés des biocarburants. Pour le Brésil, les projections, présentées dans la section consacrée à l'Amérique Latine, ont été établies sur base de l'évolution prévue pour le marché de combustibles et sur la capacité installée en unités de traitement de canne à sucre. Pour le continent africain, où l'on observe quelques initiatives pour stimuler l'usage des biocarburants, des projections de marché ont été effectuées de manière plus regroupées. Est présentée à la fin un tableau général avec la situation de chaque marché à l'horizon prévu.

Amérique du Nord (excepté le Mexique)

Le Canada comme les États-Unis développent des normes nationales pour les combustibles renouvelables, qui rendront obligatoire l'addition d'un pourcentage de biocarburants à l'essence et au diesel. Aux États-Unis, la référence actuelle pour les politiques publiques fédérales concernant les biocarburants est le Programme de Normes pour les Combustibles Renouvelables (Renewable Fuels Standard – RFS). La Loi de Politiques Énergétiques, éditée en 2005, a établi les directives de ce programme, qui fut développé et réglementé par l'Agence de Protection Environnementale des États-Unis (Environmental Protection Agency – EPA) et est entré en vigueur au 1^{er} décembre 2007. Ce programme déterminait qu'un certain pourcentage d'essence vendue ou utilisée par les automobilistes devait correspondre à un combustible renouvelable, obligation qui a été respectée sans difficulté, car les États-Unis consommaient déjà en 2007 plus de combustibles renouvelables que ce qui était exigé par la RFS [White House (2008)].

Cependant, à partir de fin 2007, avec l'édition de l'Acte de Sécurité et d'Indépendance Énergétique (Energy Independence and Safety Act – EISA), les objectifs du RFS ont été revus, en augmentant la quantité exigée de biocarburant de manière à satisfaire progressivement une demande de 136 milliards de litres de bioéthanol et d'autres biocarburants d'ici à 2022 [USDA (2008)]. Cette législation définit de nouvelles catégories de combustibles renouvelables, en fixant des niveaux minima de consommation croissants au long du temps pour les catégories de moindre impact environnemental :

Biocarburant conventionnel : défini comme bioéthanol dérivé de l'amidon de maïs. Les nouvelles unités de production d'éthanol qui commencèrent à être construites après la réglementation de cette loi doivent atteindre une réduction d'émissions de gaz à effet de serre de

20% dans leur cycle de vie, comparées aux émissions de référence. L'indice obligatoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre durant le cycle de vie peut être réduit à 10% si la EPA détermine que l'exigence est impraticable.

Biocarburant avancé : combustible renouvelable, à l'exclusion du bioéthanol de maïs, dérivé de la biomasse renouvelable, et qui atteint une réduction des émissions de gaz à effet de serre, durant son cycle de vie, de l'ordre de 50% au-dessous de la valeur de référence. Cette définition, conformément à la législation nord-américaine, inclue des biocarburants divers, comme le bioéthanol de cellulose, le bioéthanol de sucre ou d'amidon non produits à partir du maïs ; ou des biocarburants produits à partir de restes animaux, alimentaires, agricoles et domestiques, le diesel de biomasse, le biogaz (y compris le gaz des décharges et des égouts), le butanol et d'autres alcools produits à partir de la biomasse et d'autres combustibles dérivés de biomasse cellulosique.

Biocarburant cellulosique : combustible renouvelable produit sur base de cellulose, hémicellulose ou lignine, dérivé de biomasse renouvelable et qui atteint une réduction des émissions de gaz à effet de serre, durant son cycle de vie, de l'ordre de 60% au-dessous de la valeur de référence.

Les nouvelles dispositions, conformément aux déterminations de l'EISA, stipulent que les combustibles renouvelables doivent observer les limites de réduction des émissions des gaz à effet de serre durant leur cycle de vie, y compris les émissions à toutes les étapes de production de la matière première et du combustible et de distribution, en comptabilisant les émissions directes et indirectes, qui incluent les émissions résultant de changements d'utilisation de la terre. Suivant les projections du Global Biofuels Center, les nouveaux objectifs fixés par la législation nord-américaine seront probablement atteints, avec une production interne de bioéthanol de 70 millions de mètres cubes en 2015 [Global Biofuels Center (2008)].

De même, le gouvernement du Canada devrait rendre obligatoire l'addition de 5% en volume de combustible renouvelable à l'essence, à partir de 2010, et la réglementation destinée à mettre en oeuvre les normes correspondantes est en voie d'élaboration. D'après cette proposition, réaliser le mélange obligatoire créera une demande de 2,2 milliards de litres de bioéthanol en 2010, pour une offre anticipée de 2,9 milliards de litres, et avec des perspectives que de nouvelles installations de production d'éthanol soient construites et entrent en opération d'ici à 2015. De fait, en supposant la mise en oeuvre en 2015 d'un mélange avec 10% de bioéthanol, ce sont plus de 4,7 milliards de litres qui seront nécessaires, chiffre bien supérieur à la capacité de production installée actuellement.

Union Européenne

Dans l'Union Européenne, qui compte actuellement 27 états-membres, quelques pays ont commencé à s'intéresser aux biocarburants dès la décennie des années 1990, mais c'est à partir de fin 2001 qu'ont surgi des actions mieux coordonnées au niveau communautaire,

alors que l'agro-industrie bioénergétique commençait à croître, soutenue par l'adoption de politiques favorables et d'incitations fiscales en différents pays. Les deux pays où les biocarburants (le biodiesel en particulier) ont atteint la meilleure pénétration sur le marché des combustibles pour automobiles sont l'Allemagne et la Suède. Des pays disposant de grandes superficies de terres cultivables et de politiques protectionnistes par rapport à leurs agro-industries, comme la France, ont également mis en oeuvre des outils spécifiques pour la promotion de l'utilisation de biocarburants. Il est intéressant de constater qu'à partir de 2006, pour la première fois, les investissements européens en bioéthanol, associés à l'atteinte des objectifs établis pour 2010, ont dépassé les investissements en biodiesel.

D'autres états-membres, comme l'Espagne, ont encouragé la production de biocarburants sans posséder de grands marchés domestiques, dans l'intention d'exporter les excédents de leur production. Les Pays-Bas et le Royaume-Uni ont adopté des positions plus conservatrices, et considèrent les biocarburants de seconde génération comme une alternative plus durable que la première génération actuelle. Ces deux pays, cependant, ont établi des systèmes obligatoires pour l'utilisation de biocarburants. Le cas de la République Tchèque, qui est devenu état-membre en 2004, est également intéressant, en raison du développement rapide de biocarburants survenu depuis 2006, quand le prix du pétrole atteignit des niveaux élevés.

Dans le but de créer des marchés plus robustes de biocarburants, la Commission Européenne a proposé un objectif minimum obligatoire de 10% d'énergie produite sur base de biocarburants d'ici à 2020. Pour cela, la décision est traduite en directives, qui lient l'état-membre quant aux résultats à atteindre, bien qu'elles laissent aux instances nationales la compétence concernant la forme et les moyens. De la sorte, l'effet est direct, mais sans applicabilité directe [Soares (1997)]. Les deux principales directives sur l'utilisation de biocarburants dans l'Union Européenne sont la Directive pour les Biocarburants (Biofuels Directive), lancée en 2003, qui établit les objectifs d'utilisation pour les biocarburants, et la Directive pour la Qualité des Combustibles (Fuel Quality Directive), révisée en 2007, et qui considère la réduction des émissions de gaz à effet de serre et inclut les biocarburants dans les spécifications de qualité des combustibles européens.

Les objectifs établis par la Directive pour les Biocarburants sont indicatifs (non-contraignants), établis comme pourcentages en énergie sur l'utilisation de combustibles fossiles dans le secteur des transports. Pour 2005, l'objectif fut de 2% et, pour 2010, il est de 5,75%, en se référant toujours au contenu énergétique. En janvier 2008, la Commission Européenne a publié sa proposition de Directive pour l'Énergie Renouvelable, qui devra prévaloir sur la Directive pour les Biocarburants à partir de 2010. Cette directive proposée récemment inclut l'utilisation obligatoire de 10% de biocarburants par contenu énergétique jusqu'en 2020, objectif qui devra être atteint grâce à l'utilisation de biocarburants durables, définis par rapport aux paramètres établis dans la directive elle-même, et à l'utilisation de biocarburants de seconde génération, qui sera comptée en double dans la poursuite de l'objectif proposé pour 2020. La Directive pour l'Énergie Renouvelable proposée est en discussion au Parlement Européen et au Conseil des Ministres, et elle devrait être approuvée d'ici juin 2009.

D'après l'Association Européenne des Producteurs de Bioéthanol (eBIO), la production d'éthanol en 2007 a augmenté de 13,5%, un taux modeste comparé aux 70% observés en 2006 et en 2005. Cette association indique aussi que les importations d'éthanol ont battu un record en 2007, étant proches d'un milliard de litres. Le Tableau 39 montre l'évolution des indicateurs de l'agro-industrie et du marché du bioéthanol dans l'Union Européenne de 2005 à 2007.

Tableau 39 – Capacité de production et de consommation de bioéthanol dans l'Union Européenne
(En millions de litres/an)

| Année | 2005 | 2006 | 2007 |
|--------------------|-------|-------|-------|
| Capacité installée | – | 2.876 | 3.344 |
| Production | 913 | 1.593 | 1.770 |
| Consommation | 1.150 | 1.700 | 2.700 |
| Importation | 237 | 107 | 930 |

Source : Global Biofuels Center (2008).

Sur base des hypothèses adoptées pour le scénario modéré du projet « Refuel », développé sous le patronage de l'Union Européenne de façon conjointe par différentes institutions en vue de promouvoir l'utilisation de biocarburants, le bioéthanol devra atteindre l'objectif de 5% de contenu énergétique en 2010, 7,5% en 2015 et 10% en 2020 [Refuel (2008)]. Cependant, l'augmentation prévue pour la production, estimée en fonction des unités productrices de bioéthanol existantes et annoncées, démontre qu'il sera nécessaire d'importer de l'éthanol, au cas où toutes les fabriques travailleraient à 70% de leur capacité en 2010 et à 80% de leur capacité en 2015 et en 2020 [Global Biofuels Center (2008)].

Sur base de l'objectif de 10% d'éthanol pour 2020, 17,7 milliards de litres d'éthanol seront nécessaires. La capacité de production locale pourra atteindre 12,16 milliards de litres en 2015 et, ensuite, demeurer constante, car aucun nouveau projet pour la production de bioéthanol conventionnel ne fut mis en route, dans l'attente que l'éthanol cellulosique commence à entrer sur le marché [Global Biofuels Center (2008)]. En résumé, avec des objectifs obligatoires et divers pays mettant en oeuvre des objectifs individuels de consommation pour l'éthanol et le biodiesel, la croissance de la demande pourra être significative dans l'Union Européenne, au-dessus de la disponibilité interne, et les importations devront compenser la différence entre l'offre et la demande dans cette région.

Amérique Latine et Caraïbes, le Brésil inclus

La production et l'utilisation de biocarburants ont un grand potentiel, tant en Amérique Latine qu'aux Caraïbes. La majorité des pays dépend fortement de l'importation de produits

du pétrole, sans parler de la demande croissante de combustible de transport et de la grande disponibilité en matières premières adaptées à la production d'éthanol et de biodiesel. Ces pays ont en commun le désir d'augmenter leur sécurité énergétique et de promouvoir le développement économique et social associé aux biocarburants, selon la forme pratiquée au Brésil, et ils considèrent le développement de programmes de biocarburants comme un chemin pour atteindre ces deux objectifs. Dans ce but, beaucoup de pays d'Amérique Latine travaillent actuellement à l'introduction de mélanges de bioéthanol, généralement de 5% à 10% en volume dans l'essence, et dans le cas du biodiesel, de 2% à 5% en volume dans le diesel. Parmi les diverses initiatives en cours, deux pays peuvent être cités pour leurs progrès : la Colombie et la Costa Rica [Horta Nogueira (2007)].

Depuis 2001, au moyen de la promulgation de la Loi 693, commença l'implantation de la production et de l'utilisation d'éthanol en Colombie. L'exposé des motifs de cette loi présente comme objectifs principaux la réduction des émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone, le maintien et la production d'emplois agricoles, le développement agro-industriel et la contribution à l'objectif stratégique d'auto-suffisance énergétique. En résumé, cette loi établit déjà dans son premier article, que « l'essence utilisée dans les centres urbains de plus de 500 mille habitants devra, au plus tard en septembre 2006, contenir des composants tels que l'alcool carburant ». Dans cette même loi, l'essence oxygénée est définie avec un contenu de 10% de biocarburants [UPME (2006)]. Ce programme fut précédé d'une planification soigneuse et d'une information dans les milieux concernés, et est en plein fonctionnement.

La première usine colombienne de bioéthanol combustible a commencé à opérer en 2005, avec une production de 300 mille litres par jour. En 2006, cinq autres usines commencèrent également à produire ce biocarburant, toutes situées dans la vallée du rio Cauca, avec une capacité combinée de 357 millions de litres par an. Dans cette région, la culture de la canne à sucre se développe très bien, la récolte ayant lieu toute l'année, ce qui confère aux distilleries une disponibilité élevée. Le gouvernement colombien nourrit l'espoir que le pays atteigne d'ici à 2010 une capacité annuelle de production de 1,7 milliard de litres de bioéthanol, volume nécessaire pour additionner 10% d'éthanol à l'essence et obtenir des excédents exportables de l'ordre de 50% du total produit [Horta Nogueira (2007)].

En Costa Rica, les premières expériences avec le bioéthanol carburant se sont développées durant la décennie de 1980, sans continuité à cause des bas prix du pétrole à partir de 1985. Cependant, avec le scénario récent plus favorable aux biocarburants, le gouvernement de ce pays a mis sur pied un nouveau programme pour implanter l'utilisation du bioéthanol. En mai 2003, le Pouvoir Exécutif de Costa Rica a émis le Décret 31.087-MAG-MINAE, créant une Commission Technique pour « formuler, identifier et pour projeter des stratégies pour le développement de l'éthanol anhydre distillé nationalement, et utiliser les matières premières locales comme substitut du MTBE de l'essence ». Les objectifs de base présentés pour ce décret furent : le développement agro-industriel (réactivation économique, production de valeur ajoutée), amélioration de l'environnement (par exemple, par la substitution du MTBE) et, du point de vue énergétique, la diversification des sources et la réduction de la dépen-

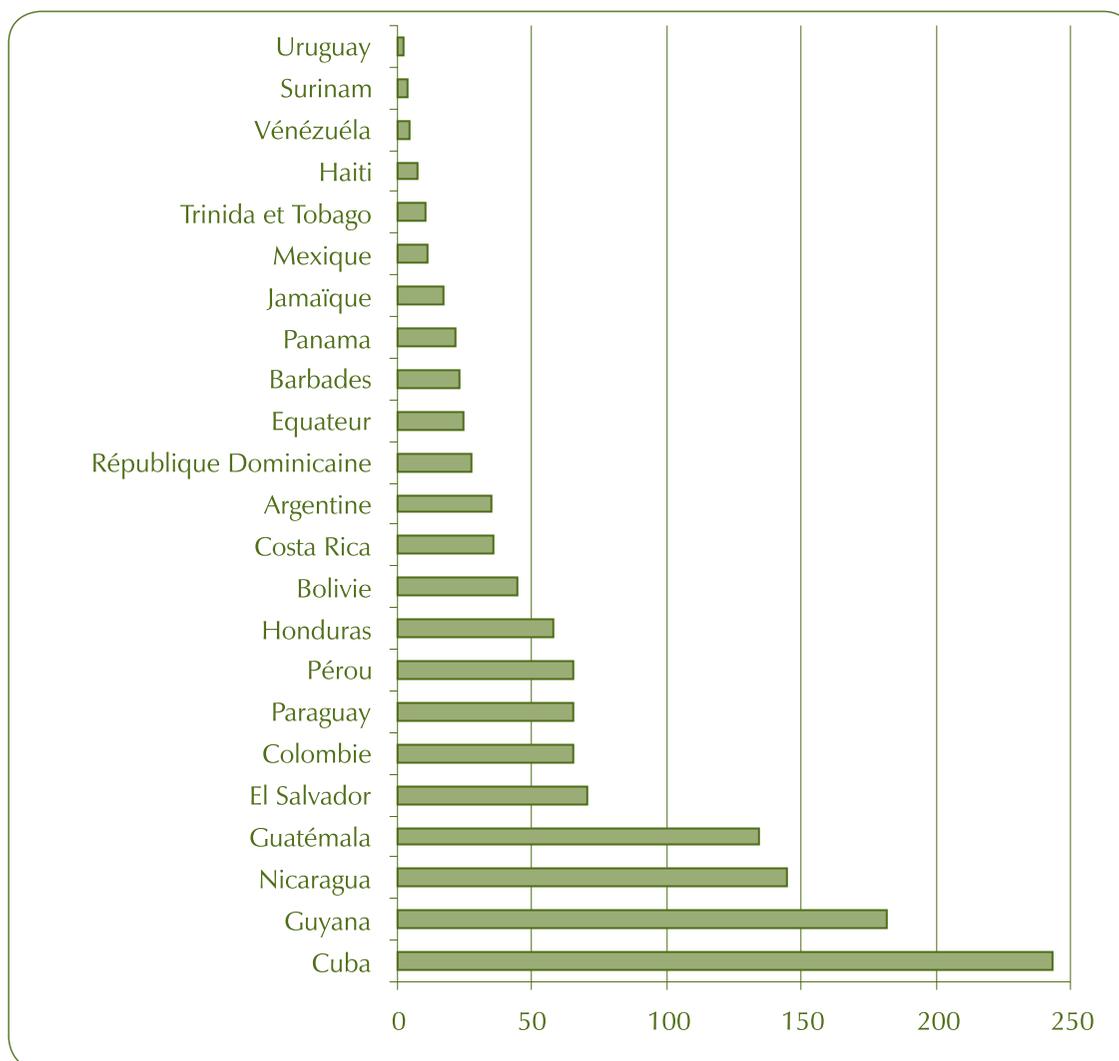
dance externe en combustible. Le programme vise l'addition, au départ, de 7,5% d'éthanol à l'essence utilisée dans le pays, et se développe par étapes successives, pour l'assimilation des procédures opérationnelles et l'expansion graduelle de l'infrastructure. Des essais préliminaires furent réalisés sur différents véhicules, avec le mélange de combustible, avec de bons résultats, conduisant ensuite à la commercialisation sur des marchés limités. Avec une addition de 10% de bioéthanol dans toute l'essence utilisée dans le pays, la demande du Costa Rica pour ce biocarburant devrait atteindre 110 millions de litres annuels en 2010. L'entreprise d'état de pétrole, Recope, a joué un rôle fondamental dans l'introduction adéquate du bioéthanol en Costa Rica [Horta Nogueira (2007)].

Pour montrer clairement le potentiel des pays latino-américains pour l'introduction d'un mélange 10% de bioéthanol de canne à sucre dans l'essence consommée sur le marché interne, du fait de la disponibilité de terres et de la dimension de l'industrie sucrière locale, deux possibilités ont été analysées [Cepal (2007)] : a) la production de bioéthanol au moyen de la conversion de la mélasse finale (ou miel épuisé), en supposant une productivité de 78 litres de bioéthanol par tonne de sucre produite ; et b) la production exclusive de bioéthanol, en prenant en considération, d'une manière conservatrice, une productivité agricole de 75 tonnes par hectare et une productivité industrielle de 80 litres de bioéthanol par tonnes de canne, ce qui correspond à 6 mille litres de bioéthanol par hectare. Pour le premier cas, a été déterminée la fraction de la demande de bioéthanol qui pourrait être satisfaite seulement à l'aide de ce sous-produit issu de la fabrication du sucre, et pour le second cas, a été déterminée la superficie de canne requise, comme pourcentage de la superficie agricole totale et comme pourcentage de l'aire actuellement cultivée en canne à sucre, données fournies par Faostat (2008a). Les données de la demande en essence et, donc, de la demande en bioéthanol, se réfèrent aux valeurs de 2004 [Olade (2006)]. Les résultats figurent aux Graphiques 38 et 39, dans lesquels ont été repris seulement les pays ayant plus de mille hectares de cultures de canne à sucre. Comme le Brésil a déjà un ample programme de production et d'utilisation de bioéthanol, y compris le bioéthanol pur, cela n'aurait pas de sens d'utiliser ces indicateurs, et pour cette raison, le pays a été exclu de cette analyse. Plus loin, seront présentées les projections de marché et de production spécifiques pour le contexte brésilien.

Comme indiqué aux Graphiques 38 et 39, le bioéthanol de canne à sucre peut être produit dans la limite des nécessités nationales, sans impacts significatifs. En moyenne, pour la région latino-américaine, avec comme objectif un mélange de 10% de bioéthanol dans l'essence, l'exigence de biocarburant pourrait être satisfaite à 35% en utilisant les mélasses existantes ou, alternativement, en augmentant de 22% la superficie actuelle des cultures de canne, ce qui signifie environ 0,4% de la superficie agricole dans la production, mais avec une diversité notoire entre les pays. Ainsi, Cuba, le Guatemala, le Guyana et le Nicaragua offrent une disponibilité potentielle élevée de production de bioéthanol, sur base de la mélasse, supérieure à la nécessité correspondant à un mélange 10% dans l'essence. Dans un autre extrême, en Haïti, au Surinam, en Uruguay et au Vénézuéla, la dimension de l'agro-industrie de la canne à sucre ne répond même pas à 10% des nécessités en éthanol dans le schéma en question. Du point de vue des disponibilités de terre, la situation peut être considérée apparemment

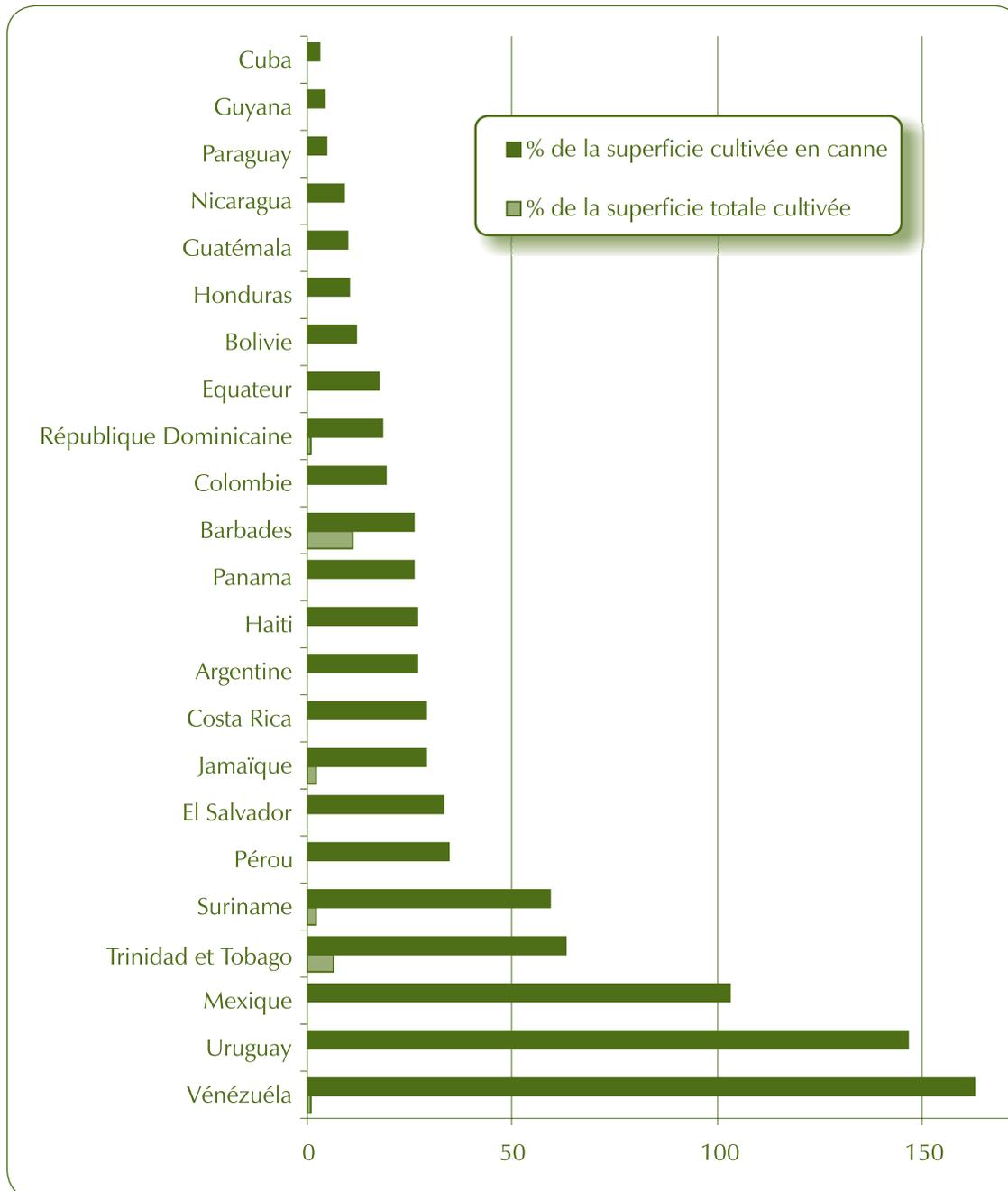
presque sans restriction dans la région latino-américaine. À l'exception des Barbades, de la Jamaïque, de Trinidad et Tobago, du Surinam et du Vénézuéla, il serait possible de produire de l'éthanol en quantité suffisante pour le mélange à 10% avec moins de 1% de la superficie agricole du pays.

Graphique 38 – Fraction de la demande de bioéthanol pour ajouter 10% à l'essence possible d'être produite au moyen de la conversion du miel résiduel disponible dans la fabrication du sucre



Source : Cepal (2007).

Graphique 39 – Fraction des superficies cultivées (totale et en canne) nécessaire pour produire le bioéthanol requis pour additionner 10% à l'essence, en supposant la conversion du jus direct



Source : Cepal (2007).

Un autre facteur important qui a stimulé la production de bioéthanol dans les pays d'Amérique Latine et aux Caraïbes est la restructuration du régime sucrier par l'Union Européenne dans le cadre de la Politique Agricole Commune, qui réduira les garanties de prix pour ces pays de 36% en quatre ans. En réponse, des pays comme les Barbades, Belize, la Jamaïque et le Guyana pensent orienter leurs disponibilités de sucre vers la production d'éthanol. A ce propos, la Jamaïque est le pays le plus avancé, car il a l'intention de mettre en oeuvre en 2008 le mélange obligatoire de 10% de bioéthanol dans l'essence.

En plus de fournir à leurs marchés internes, souvent avec des dimensions limitées, les pays latino-américains ont évalué la possibilité d'exporter du bioéthanol, spécialement aux Etats-Unis. Quelques accords fournissent un support à ces initiatives, comme l'Accord de Libre Commerce de l'Amérique Centrale et de la République Dominicaine (Dominican Republic – Central American Free Trade Agreement, DR-Cafta), ratifié par le Congrès americano en 2005, et l'Initiative du Bassin des Caraïbes (Caribbean Basin Initiative – CBI), établie par le Congrès américain en 1983 et qui exempte de conditions déterminées les produits importés des pays bénéficiaires (Antigua et Barbuda, Aruba, Bahamas, Barbades, Belize, Îles Vierges Britanniques, Costa Rica, Dominica, République Dominicaine, El Salvador, Granada, Guatemala, Guyana, Haïti, Honduras, Jamaïque, Montserrat, Antilles Hollandaises, Nicaragua, Panamá, Saint Christophe et Névis, Santa Lucia, São Vicente et les Grenadines et Trinidad et Tobago).

Dans le contexte de la CBI, dans la majorité des cas, l'éthanol hydraté est embarqué du Brésil vers les pays membres, où il est déshydraté et ré-exporté aux États-Unis. Les principaux exportateurs utilisant ce schéma sont la Jamaïque, le Costa Rica, El Salvador et, plus récemment, Trinidad et Tobago. Selon les règles de la CBI, le bioéthanol peut être exporté dans les cas suivants : a) volumes allant jusqu'à 7% du marché américain, sans restrictions d'origine c'est-à-dire qu'il est accepté que le biocarburant soit seulement traité dans le pays, b) 132 millions de litres de bioéthanol comme contingent supplémentaire, devant contenir au moins 35% de produit local ; et c) un volume illimité de biocarburant à condition qu'il contienne plus de 50% de contenu local. Les importations de bioéthanol dans le marché nord-américain se sont situées à 4,6 milliards de litres en 2006 et en 2007, dans leur majeure partie (près de 75%) effectuées par le biais de la CBI et, en moindre volume, originaires directement du Brésil, du Canada et d'autres pays [Global Biofuels Center (2008)].

Pour cette région, excluant le Brésil, une projection de l'offre et de la demande de bioéthanol, a été élaborée, et sera présentée plus loin, en même temps que les valeurs pour les autres régions. Il a été tenu compte des pays ci-après qui mettent ou mettront en oeuvre des programmes de biocarburant d'ici à 2010 : Argentine, Colombie, Costa Rica, République Dominicaine, Equateur, Jamaïque, Mexique, Paraguay, Pérou, Trinidad et Tobago, Uruguay et Vénézuéla. Il a été considéré que l'offre jusqu'en 2010 inclurait la production d'unités actuellement en opération et en construction et projetées pour entrer en opération jusqu'à cette année. Il est aussi supposé que, d'ici à 2015, la majeure partie des unités prévues actuellement sera construite. La capacité nominale a été utilisée pour estimer le potentiel

d'offre et la demande a été calculée sur la base de la demande en essence et de la mise en oeuvre des objectifs [Global Biofuels Center (2008)].

L'analyse réalisée a montré que divers pays devront augmenter leur capacité pour atteindre les objectifs prévus pour les prochaines années. Plusieurs pays se trouveront, ou se trouveront encore, dans la position d'exportateurs de bioéthanol durant ces années : Costa Rica, Jamaïque, Paraguay, Pérou, Trinidad et Tobago et même l'Uruguay. Les exportations de tous les pays, excepté le Pérou, continueront d'aller aux États-Unis selon les programmes applicables aux termes des accords commentés plus haut. Le Pérou, spécifiquement, pourra exporter ses produits dans le marché américain sous les auspices de l'Accord de Libre Commerce États-Unis-Pérou, ratifié par le Congrès nord-américain en décembre 2007 [Global Biofuels Center (2008)].

Les perspectives du marché de bioéthanol dans le cas brésilien sont, évidemment différentes de celles des autres pays de la région latino-américaine, à cause de la maturité de son programme de biocarburants et de la grande expansion observée dans la consommation et dans la capacité de production de bioéthanol, comme montré en détails au chapitre antérieur. L'intense dynamique observée dans cette agro-industrie rend aussi difficile d'estimer des scénarios, puisque de nouveaux projets ont été lancés avec fréquence, visant au départ la consommation interne croissante de bioéthanol. Cependant, pour établir un niveau de production et de consommation à des horizons pertinents, plusieurs estimations ont été réalisées, sur une base conservatrice. Pour la production de bioéthanol, il a été pris pour base la production estimée pour 2008, de près de 26,1 milliards de litres, et un taux de croissance annuelle de 8%, cohérent avec l'évolution vérifiée ces dernières récoltes. Vu le nombre de projets actuellement en implantation, avec 35 nouvelles usines entrant en opération pour la récolte de 2008/2009 et 43 autres unités qui doivent démarrer pour la récolte suivante [Nastari (2008)], une production de bioéthanol de 30,5 milliards de litres est attendue en 2010. Pour la période suivante, le marché externe devra offrir un plus grand débouché, et la capacité de production de bioéthanol devra atteindre en 2015, environ 47 milliards de litres, ce qui équivaut à un taux de croissance annuelle de 9% [BNDES (2008)].

En ce qui concerne la demande de bioéthanol sur le marché brésilien, les estimations présentées il y a quelques années se sont révélées timides et ont été largement surpassées par la réalité, principalement à cause de l'expansion du marché des véhicules à moteur flex-fuel. Cependant, cette technologie des véhicules introduit de nouvelles incertitudes dans les projections de la demande, puisque l'utilisateur a la possibilité de choisir entre le bioéthanol pur et l'essence (avec du bioéthanol). D'autre part, le gouvernement peut altérer le teneur du mélange en éthanol, entre 20% et 25%, affectant ainsi directement la demande effective de bioéthanol anhydre. Ces facteurs, conjugués au cadre incertain des prix, augmentent la marge d'erreur de la projection de consommation. Une évaluation de l'évolution de la flotte de véhicules légers au Brésil et des historiques de consommation en combustibles indique que, pour 2015, la demande interne de bioéthanol pourra se situer entre 28 milliards de litres et 34,3 milliards de litres, en supposant que 50% et 75% de la consommation des véhicules flex, respectivement, viendront du bioéthanol hydraté [BNDES (2008)]. Cette même étude

présente diverses projections du marché brésilien, avec une dispersion raisonnable entre les estimations. De manière conservatrice, et par analogie avec la projection de l'offre, il a été supposé que la majeure partie de la production de bioéthanol devra servir le marché national, avec une exportation de 5 milliards de litres en 2010, valeur approximative des exportations observées en 2008, et 10 milliards de litres en 2015, quand le marché international de biéthanol devra déjà être bien mieux structuré. Observons que la demande interne en bioéthanol correspond aux utilisations par les véhicules et aux applications industrielles, segment qui va en grandissant de façon importante au Brésil.

Afrique

La moindre dimension relative du marché africain de combustibles et la base limitée d'informations sur les projets de biocarburants dans les divers pays ne signifient pas que cette région offre moins d'intérêt dans les évaluations prospectives pour le bioéthanol. En vérité, ce continent présente, en particulier dans sa partie sud, des régions ayant un potentiel énergétique évident et important, et où l'utilisation des biocarburants pourra s'allier à d'autres objectifs de développement social et économiques, ce qui est recherché par divers pays.

Depuis la décennie des années 1980, il existe une tendance à promouvoir l'utilisation de bioéthanol en Afrique. Deux initiatives pionnières peuvent être mentionnées : au Malawi, depuis 1982, la société Ethanol Company of Malawi (ETHCO) est en opération, et fabrique de l'éthanol à base de mélasse de canne à sucre à des fins combustibles, et au Zimbabwe, le programme de bioéthanol combustible lancé en 1980, et interrompu ensuite après une grave sécheresse au début de la dernière décennie, pourra être remis en opération [Gnansounou et al. (2007)]. Plus récemment, au Nigéria, des tests ont été effectués avec du bioéthanol dans l'essence à partir de 2006, et des chefs d'entreprise d'Afrique du Sud ont manifesté de l'intérêt pour la mise en oeuvre d'unités de production de bioéthanol, spécialement après que le gouvernement sud-africain ait évoqué la possibilité d'introduire l'utilisation obligatoire de ce biocarburant mélangé à l'essence [SouthAfrica (2006)]. Au Ghana a été mise en oeuvre une unité de production d'une capacité de 150 millions de litres annuels de bioéthanol de canne à sucre, suivant un modèle qui pourra être reproduit en Tanzanie et au Mozambique [F.O.Licht (2008b)]. Il y a actuellement au moins 11 pays du continent qui créent des règles pour la production et la commercialisation de bioéthanol, entre autres, l'Afrique du Sud, l'Angola, le Mozambique et le Bénin. La majorité a l'intention d'adopter le mélange de 10% de bioéthanol dans l'essence [Exame (2007)].

La production de bioéthanol de canne à sucre observée en 2006 en Afrique fut de 439 millions de litres, provenant à 89% de l'Afrique du Sud. De façon agglomérée et préliminaire, au vu des informations sur le potentiel de consommation interne d'essence et des perspectives d'exportation associées aux bonnes conditions de productivité sur le continent africain, les scénarios conservateurs de la demande indiquent un volume de 1 milliard de litres et de 1,5 milliard de litres en 2010 et en 2015, respectivement. À son tour, la production en 2010 se situerait au niveau de la demande, et une exportation de 500 millions de litres en 2015 pourrait être envisagée.

Il est certain que l'Afrique tend à devenir à moyen terme un acteur d'une importance croissante sur la scène bioénergétique. Dans un travail conjoint du Ministère des Relations Extérieures et du Ministère de l'Agriculture, le gouvernement brésilien a encouragé le plantage de canne à sucre et l'installation de distilleries dans des pays comme le Botswana, le Congo, le Gabon et la Tanzanie. Au vu des disponibilités de sol et des caractéristiques de climat, les pays de la région sud de ce continent disposeraient de meilleures possibilités de développer des programmes de production bioénergétique, et notamment : l'Afrique du Sud, la Zambie, l'Angola, le Mozambique, le Zimbabwe, le Malawi et Madagascar, fondamentalement au moyen de la diversification de l'agro-industrie de la canne à sucre déjà existante [Gnansounou et al. (2007)].

Asie et Océanie

La région de l'Asie et de l'Océanie s'est révélée active dans la mise en oeuvre de programmes de biocarburants et dans l'utilisation de ressources agricoles pour la production de biocarburants, répondant à une demande interne croissante, en plus d'éventuels marchés externes. Cependant, quelques pays asiatiques n'ont pas été capables d'atteindre à temps certains objectifs ambitieux ou ont fait preuve de prudence dans la commercialisation de biocarburants, à cause des incertitudes sur le prix, l'offre à long terme, la logistique et l'infrastructure, en plus de questions associées aux craintes au sujet de la fiabilité des véhicules roulant au biocarburant.

Les motivations pour la promotion des biocarburants sont différentes entre les pays asiatiques et l'Océanie. Les pays développés de la région, comme l'Australie, le Japon, la Nouvelle-Zélande et la Corée du Sud, ont cherché dans les combustibles renouvelables une forme d'atteindre leurs objectifs du Protocole de Kyoto pour la réduction des émissions de CO₂ jusqu'en 2012, indépendamment du fait que ces objectifs soient obligatoires ou volontaires. Ainsi, les programmes de biocarburants ont été introduits dans ces pays, principalement au moyen de l'établissement d'objectifs de production ou de ventes. Cependant, le Japon, la Corée du Sud et Taiwan n'ont pas les disponibilités en terres suffisantes pour développer des cultures énergétiques, à cause de la haute densité de population, ce qui limite la production aux biocarburants à base d'huiles recyclées et de déchets.

L'offre de matière première à long terme est une question primordiale pour ces pays. Comme exemple des lignes de conduite possibles, le Japon a présenté un plan pour le développement graduel d'un programme de biocarburants, en établissant comme objectif l'addition de bioéthanol à l'essence utilisée en volumes correspondant à 0,6% de la consommation des véhicules en énergie fossile dans le pays, jusqu'en 2010, ce qui signifie un volume annuel de 500 millions de litres de ce biocarburant. C'est un programme certainement encore modeste, mais qui est le signe d'une disposition favorable, et qui commença avec l'introduction de 7% en volume de ETBE dans une partie de l'essence vendue dans la région de Tokyo en 2007. Pour 2030 est envisagée l'adoption de 10% de biocarburants dans la demande énergétique en transports.

Le gouvernement japonais, avec l'appui de l'industrie automobile locale, a réalisé également des tests avec 3% de bioéthanol dans les villes de Osaka et Miyakojima, cette dernière étant située dans l'île de Okinawa, où est cultivée la canne à sucre [Global Biofuels Center (2008)]. Récemment, Petrobras et l'entreprise japonaise de commerce extérieur, Mitsui, ont formalisé la constitution d'une société au Brésil pour les investissements dans des projets de bioénergie, principalement dans le but de produire de l'éthanol pour le marché japonais.

De leur côté, des pays en développement comme la Chine, l'Inde, l'Indonésie, les Philippines et la Thaïlande envisagent d'utiliser des biocarburants à base d'excédents de production agricole, surtout pour réduire leur dépendance envers les combustibles conventionnels et en même temps, diminuer les émissions à impact local et garantir la stabilité aux agriculteurs. L'Indonésie et les Philippines vont plus loin, voyant dans les biocarburants une solution pour stimuler l'activité économique et réduire leur dette extérieure. Des programmes de promotion de biocarburants ont été mis en oeuvre dans ces pays, en établissant des objectifs ou des mesures qui rendent obligatoires les mélanges de biocarburants dans certains pourcentages.

Dans le cas de la Chine, l'objectif publié est d'ajouter 10% d'éthanol à l'essence dans cinq provinces, ce qui devrait correspondre à une demande annuelle de 1,6 milliard de litres, demande qui devra augmenter peu à peu avec l'entrée d'autres provinces dans le programme. Cependant, l'Inde et la Thaïlande, avec des objectifs d'ajouter 10% de bioéthanol et une consommation initiale estimée respectivement à 400 millions et 300 millions de litres par an, ont affronté des obstacles logistiques dans la mise en oeuvre de programmes de mélange de bioéthanol et se montrent prudents à l'égard de leurs programmes pour le biodiesel [Global Biofuels Center (2008)].

Les dérivés du pétrole sont fortement subventionnés dans la région asiatique et en Océanie, ce qui stimule l'emploi des biocarburants comme alternative pour la substitution de combustibles conventionnels. Comme résultat, la majeure partie des pays se dirige vers l'introduction de l'utilisation du bioéthanol avec des teneurs de 5% à 10%, notamment l'Australie, l'Inde, l'Indonésie, le Japon, la Nouvelle-Zélande, les Philippines et la Thaïlande. Il existe actuellement une production notable de bioéthanol en Australie, en Chine et en Inde, mais ces pays devront l'augmenter pour atteindre leurs objectifs.

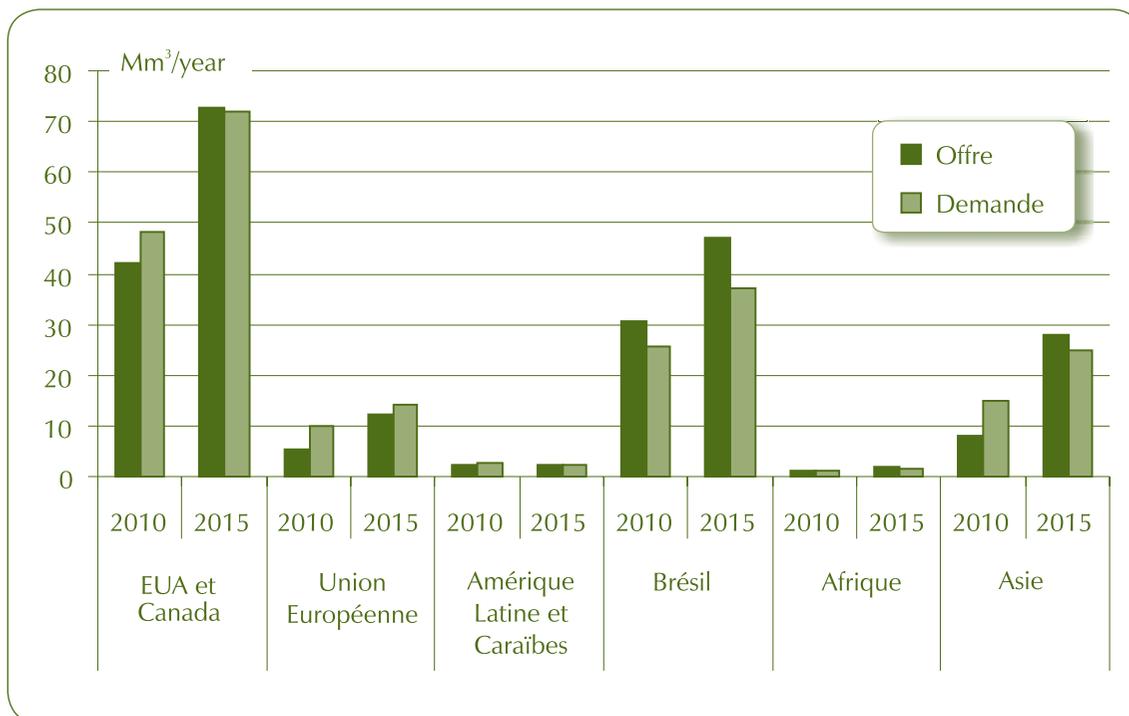
Dans l'étude prospective de l'offre et de la demande pour la région, présentée ci-après, les pays suivants ont été inclus : Australie, Chine, Inde, Indonésie, Japon, Nouvelle-Zélande, Philippines et Thaïlande, en supposant que tous atteindront les objectifs fixés pour l'introduction du bioéthanol en 2010 et en 2015. Le résultat général pour la région serait un déséquilibre en 2010, en raison d'un manque de bioéthanol, déséquilibre qui devra être surmonté en 2015. L'Australie, l'Inde et la Chine devront mettre en oeuvre de nouvelles unités de production pour atteindre leurs objectifs, mais resteront dépendants des importations en 2010 ; en 2015, ils pourront s'en affranchir grâce à la production locale. Le Japon dépendra exclusivement des importations. Le Japon, la Chine et, potentiellement, l'Australie et la Nouvelle-Zélande,

seront de grands importateurs d'éthanol dans la région. D'ici à 2015, l'Inde, l'Indonésie et la Thaïlande devraient être en conditions d'exporter [Global Biofuels Center (2008)].

Tableau général de l'offre et de la demande en bioéthanol en 2010 et en 2015

Présentées de façon résumée au Graphique 40, les perspectives de marché pour le bioéthanol dans les régions évaluées durant la période étudiée présentent de grandes différences et, par conséquent, les conditions et la capacité à participer à un futur marché international pour ce biocarburant sont contrastées. Considérés globalement, ces marchés devraient représenter, en 2010, une demande en bioéthanol de 101 milliards de litres, face à une offre estimée à 88 milliards de litres, la situation tendant vers l'équilibre en 2015 avec une offre aux environs de 162 milliards de litres pour une demande plafonnant à 150 milliards de litres.

Graphique 40 – Estimations d'offre et de demande en bioéthanol combustible pour 2010 et 2015



Source : Modifié sur base de Global Biofuels Center (2008).

En résumé, est attendue pour les prochaines années une croissance significative de la demande aux Etats-Unis, en particulier à cause de la nouvelle législation imposant l'addition annuelle de plus de 57 milliards de litres de bioéthanol à l'essence nord-américaine d'ici à 2015. Pour cette raison, ce pays devra probablement avoir recours à l'importation, sauf si de nouvelles méthodes de production se révèlent viables rapidement.

En Europe, en vue de l'objectif de 5% en 2010 et de 7,5% jusqu'en 2015, la demande d'éthanol devra augmenter également de façon significative. Au Brésil, la demande interne, en forte expansion, pourra être aisément satisfaite par la production locale, dégageant un grand potentiel pour prendre part activement au marché international du bioéthanol, si celui-ci devient une réalité concrète. Pour les autres régions étudiées, la croissance devrait être modérée. Cependant, en Amérique Latine et aux Caraïbes, divers pays devront se préparer mieux pour atteindre leurs objectifs nationaux, sans parler d'une éventuelle expansion de la production orientée vers le marché nord-américain, en particulier dans les pays qui peuvent avoir accès à un tel marché à des conditions privilégiées.

Les pays asiatiques et de l'Océanie seront probablement limités pour répondre à la demande d'ici à 2010, mais des progrès devraient avoir lieu durant la période allant jusqu'en 2015. Selon l'analyse développée aux paragraphes antérieurs, le Japon et la Chine et, potentiellement, l'Australie et la Nouvelle-Zélande, devront être les grands importateurs d'éthanol dans la région. D'autre part, jusqu'en 2015, l'Inde, l'Indonésie et la Thaïlande pourront se retrouver dans position d'exportateurs, mais sans atteindre la capacité du Brésil [Global Biofuels Center (2008)]. Quant à l'Afrique, les incertitudes sont très grandes, mais une croissance modérée du marché interne est envisageable, avec une possibilité d'exportation vers le marché européen, au cas où celui-ci croîtrait à un rythme plus accéléré.

Il est important d'observer que ces projections ont été développées durant la fin 2007 et le début de 2008, période de grandes indéfinitions quant au prix du pétrole. Si les prix de référence des combustibles fossiles se maintiennent à des niveaux élevés, il est difficile de prévoir comment se comportera la demande de bioéthanol, qui représente déjà actuellement une des rares alternatives disponibles rapidement pour remplacer l'essence.

Pour conclure cette étude prospective du marché global du bioéthanol, il faut mentionner qu'estimer et suivre les flux de ce biocarburant dans le monde ne sont pas des tâches aisées, en raison des innombrables restrictions à l'accès aux informations. Il est souhaitable que la coopération internationale dans ce domaine contribue à l'élargissement de la base de données et d'informations sur les marchés de bioéthanol, dans une plus grande transparence qui serait bénéfique pour tous les pays.

Conditions fondamentales pour que se développent, au cours des prochaines années, les potentiels de production et, par conséquent, les marchés du bioéthanol esquissés aux paragraphes antérieurs, les politiques adaptées à la promotion des biocarburants dans les principaux pays consommateurs feront l'objet du prochain paragraphe.

8.4 Politiques de soutien et d'encouragement aux biocarburants

Dans le domaine institutionnel, les politiques et les normes légales associées aux biocarburants, définies et mises en oeuvre à un degré variable de clarté et d'objectivité, constituent des éléments importants qui expliquent et justifient l'évolution de la demande globale de bioéthanol présentée aux paragraphes antérieurs. Pour réviser ces politiques, le Tableau 40 présente les principaux objectifs et motivations des programmes de politiques publiques orientées vers les biocarburants, et d'éventuels projets pour leur mise en oeuvre effective, données obtenues des documents officiels des divers pays et de l'Union Européenne [GBEP (2007)].

Tableau 40 – Principaux objectifs pour le développement de la bioénergie

| Pays | Objectifs | | | | | | |
|------------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---|-----------------------------------|
| | limiter le changements climatique | Améliorer l'environnement | Augmenter la sécurité énergétique | Promouvoir le développement rural | Stimuler l'agriculture | Stimuler le développement technologique | Obtenir des avantages économiques |
| Pays +5 | | | | | | | |
| Afrique du Sud | X | | X | X | | | |
| Brésil | X | X | X | X | X | X | X |
| Chine | X | X | X | X | X | | |
| Inde | | | X | X | | X | X |
| Mexique | X | X | X | X | | X | |
| Pays du G8 | | | | | | | |
| Allemagne | X | X | | X | X | X | X |
| Canada | X | X | X | | | X | |
| États-Unis | X | X | X | X | X | X | |
| France | X | | X | X | X | | |
| Italie | X | X | X | | X | | |
| Japon | X | X | | | X | X | |
| Royaume Uni | X | X | X | X | | | X |
| Russie | X | X | X | X | X | X | |
| Union Européenne | X | | X | X | X | X | |

Source : GBEP (2008).

D'après ce tableau, élever le niveau de sécurité énergétique et atténuer le changement climatique figurent parmi les facteurs de motivation les plus importants pour les programmes bioénergétiques dans la majorité des pays. Les questions environnementales sont d'avantage présentes dans les pays développés, tandis que le potentiel des biocarburants pour promouvoir le développement rural est un facteur d'impulsion important pour les pays en développement, c'est d'ailleurs un objectif presque toujours aligné sur un agenda de lutte contre la pauvreté. La croissance de l'utilisation de biocarburants est vue également dans ces pays comme une opportunité de promouvoir l'accès à une énergie moderne, ce qui inclut l'électrification des zones rurales. Notons que les objectifs de développement rural dans les pays industrialisés, de manière diverse, se concentrent sur l'aspect multifonctionnel de l'agriculture en termes d'alimentation et de services environnementaux et culturels.

Dans les pays en développement, les objectifs agricoles entendent de nouvelles opportunités, non seulement pour la commercialisation de la production des cultures énergétiques sophistiquées, mais aussi pour l'offre à une moindre échelle de produits plus accessibles. Tous les pays mettent en évidence dans leurs politiques au moins trois objectifs centraux et concurrents, ce qui peut rendre complexe le développement de la bioénergie dans la mesure où atteindre des objectifs multiples, et souvent non totalement compatibles, peut se révéler une tâche ardue. Il est important de rappeler que la focalisation sur le développement et sur la protection de la production agricole dans certains pays de l'OCDE a conduit à des programmes non-durables de biocarburants [UN-Energy (2007)]. En résumé, les politiques de promotion des biocarburants s'orientent vers des objectifs multiples, représentant un défi, éventuellement au-delà des possibilités d'une transition de matrices énergétiques, qui en elle-même, s'annonce déjà complexe.

Dans de nombreux pays, le développement et l'utilisation de la bioénergie sont orientés principalement par des politiques énergétiques, comme le montre le Tableau 41, avec des exemples de mesures adoptées pour cette finalité [GBEP (2007)]. Dans ce tableau, les mesures volontaires, en particulier pour les biocarburants, concernent l'autorisation pour les mélanges avec des combustibles conventionnels et l'introduction progressive sur le marché, tandis que les incitations directes comprennent celles financées par le pouvoir public, comme la réduction d'impôts, les subventions d'appui et la garantie des prêts en rapport avec les biocarburants. Observons encore que ce tableau présente les instruments de politiques énergétiques pour la bioénergie, en séparant les diverses utilisations finales, comme le chauffage, la production d'électricité, le transport, l'éthanol et le biodiesel. Les politiques de l'Union Européenne sont valables pour les pays-membres, qui peuvent aussi établir d'autres mesures à caractère national, comme c'est le cas pour l'Allemagne, la France et l'Italie.

Tableau 41 – Principaux instruments de politique énergétique en rapport avec la bio-énergie

| Pays | Politique énergétique | | | | | | | |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|--|-----------------|---|------------------------|---------------------|
| | Objectifs obligatoires | Objectifs volontaires | Incitations directes | Subventions | Tarifs garantis | Connexion obligatoire avec le réseau public | Critères de durabilité | Taxes différenciées |
| Pays +5 | | | | | | | | |
| Brésil | T | E | T | | | | | Et |
| Chine | | E,T | T | E,T | E, H | E,H | | n/a |
| Inde | T, (E*) | | E | E,H,T | E | | | n/a |
| Mexique | (E*) | (T) | (E) | | | (E) | | Et |
| Africa du Sud | | E, (T) | (E),T | | | | | n/a |
| Pays du G8 | | | | | | | | |
| Canada | E** | E**,T | T | E,H,T | | | | Et |
| France | | E*,H*,T | E,H,T | | E | | | Et ; B |
| Allemagne | E*,T | | H | H | E | E | (E,H,T) | Et ; B |
| Italie | E* | E*,T | T | E, H | E | E | | Et ; B |
| Japon | | E,H,T | | | | E | | Et ; B |
| Russie | | (E,H,T) | (T) | | | | | n/a |
| Royaume Uni | E*,T* | E*,T | E,H,T | E,H | E | | T | Et ; B |
| États-Unis | T | E** | E,T | E,T | | | | Et |
| Union Européenne | E*, T | E*,H*, T | T | E,H,T | | E | (T) | Et ; B |
| Conventions | | | | | | | | |
| Technologie bioénergétique | | | | * : l'objectif s'applique à toutes les énergies renouvelables | | | | |
| E : électricité | | | | ** : l'objectif est déterminé au niveau sous-national | | | | |
| H : chauffage | | | | (..) : instrument de politique encore en développement ou en attente d'approbation | | | | |
| T : utilisation en transport | | | | n/a : non disponible ou non informé | | | | |
| Et : production d'éthanol | | | | | | | | |
| B : production de biodiesel | | | | | | | | |

Source : GBEP (2007).

Comme indiqué au Tableau 41, la grande majorité des mesures de politique énergétique en rapport avec l'encouragement de la bioénergie est associée aux utilisations pour la production d'énergie électrique, le chauffage et le transport, avec des mesures orientées spécifiquement pour stimuler la production d'éthanol et de biodiesel, mesures prises uniquement sur le plan fiscal et douanier. De toute manière, la mise en oeuvre de mesures de politique dans le secteur des transports présente une connexion immédiate avec l'encouragement des biocarburants. Il est évident également qu'une bonne partie des mesures est en phase de développement ou en attente d'approbation (présenté entre parenthèses dans le tableau). En résumé, les instruments de promotion du bioéthanol sont connus et se trouvent en phase de mise en oeuvre progressive.

Des relevés comme ceux effectués par le Worldwatch Institute [REN21 (2008)] confirment les progrès normatifs importants en cours pour augmenter l'utilisation du bioéthanol. Au cours des trois dernières années, des instructions normatives ont été promulguées concernant le mélange dans 17 pays au moins, au niveau national, et la majorité d'entre elles fixait, de forme obligatoire, un mélange de 10% à 15% d'éthanol dans l'essence (ou un mélange de 2% à 5% de biodiesel avec le diesel combustible). Pourraient être citées également les instructions normatives sous-nationales relatives au bioéthanol, avec des décisions de gouvernements locaux dans 13 états de l'Inde, 9 provinces chinoises, 9 états des Etas-Unis, 3 provinces canadiennes et 2 états australiens, ce qui prouve l'importance des conditions, des possibilités et des intérêts locaux.

8.5 Connexions entre alimentation et bioénergie

En analysant les perspectives d'un marché global de bioéthanol, développé sur des bases durables, il est essentiel de comprendre les interactions entre les marchés des aliments et la production bioénergétique, pour une évaluation correcte des effets plus amples de l'augmentation de la production de biocarburants, dans leurs différentes configurations productives. La crise préoccupante de la fourniture d'aliments, avec la forte montée des prix observée dans de nombreux pays en 2007 et 2008, coïncidant avec l'expansion de la production de biocarburants à l'échelle globale, a confirmé l'importance d'évaluer de manière adéquate son impact sur la disponibilité et le comportement des prix des produits agricoles d'intérêt familial.

Ce thème sera présenté dans ce paragraphe, d'abord en révisant les concepts de sécurité alimentaire et en évaluant leurs exigences face à l'expansion de la production bioénergétique, Seront abordés ensuite les principaux facteurs qui affectent l'équilibre entre la demande et l'offre d'aliments. Le rôle actuel et potentiel des biocarburants dans ce cadre est complexe, et les conséquences et les implications de la bioénergie sur la sécurité alimentaire peuvent être exploitées au moyen de modèles analytiques détaillés, déjà mentionnés au début de ce chapitre, pour l'estimation du potentiel bioénergétique : ils seront présentés ici comme

exemples des efforts en cours pour la compréhension adéquate de cette problématique. Enfin, l'évolution de quelques séries de prix du pétrole, de vecteurs bioénergétiques et de biens agricoles destinés à d'autres finalités sera présentée car elle constitue un autre facteur important de compréhension,

La sécurité alimentaire et la production de bioénergie

La sécurité alimentaire est un thème central pour la FAO, qui la définit comme « la situation dans laquelle toutes les personnes, à tout moment, ont accès à une quantité suffisante, sûre et nutritive d'aliments pour satisfaire leurs nécessités diététiques et leurs préférences alimentaires pour une vie active et saine » [FAO (2008b)]. Toujours selon cette institution, la sécurité alimentaire présente quatre dimensions : disponibilité, accès, utilisation et stabilité, qui seront analysées ci-après, en considérant en particulier leur rapport avec l'expansion de la production bioénergétique.

En ce qui concerne la première de ces dimensions – l'impact de la production des biocarburants sur la disponibilité de ressources pour la production d'aliments –, il est opportun de constater que l'utilisation de terres agricoles pour la production de matières premières d'intérêt énergétique est presque négligeable face à la superficie totale cultivée. En effet, actuellement, près de 1% seulement des terres cultivables du monde est utilisé pour la production de biocarburants liquides, avec des perspectives d'augmentation de 3% à 4% en 2030 [BFS/FAO (2008)].

De même, il est difficile de croire qu'il existe des restrictions effectives de superficie pour la production d'aliments et de biocarburants, sachant que les terres cultivées actuellement sur toute la planète (environ 1,5 milliard d'hectares), représentent approximativement 12% des terres cultivables. En outre, une fraction importante de la production actuelle de grains est destinée à l'alimentation animale, répondant de manière assez asymétrique aux nécessités alimentaires de la population mondiale. Cette situation se produit, par exemple, avec le maïs nord-américain et le soja brésilien, produits largement utilisés pour la formulation de rations pour les systèmes d'élevage, avec un rapport production/consommation calorifique de l'ordre de 15%.

Dans le même objectif identique de produire de la protéine animale, et présentant une très basse efficacité de conversion, l'aire occupée par les pâturages dans tous les pays est estimée à 3,5 milliards d'hectares, représentés surtout par des pâturages natifs d'une productivité limitée. Augmenter de 1% la productivité de ces zones de pâturage, grâce à un entretien adéquat et à l'utilisation de fourrages d'un rendement supérieur, permettrait de libérer une superficie de 35 millions d'hectares, superficie supérieure aux 23 millions d'hectares estimés comme suffisants pour promouvoir l'addition de 10% de bioéthanol de canne à sucre sur le marché mondial de l'essence.

Structurellement, ce ne sont pas les limitations de terres qui forment un obstacle à la sécurité alimentaire et qui restreignent les possibilités de production de biocarburants. De même, la crise actuelle du marché de produits alimentaires n'est décidément pas une crise d'insuffisance de production d'aliments. La production mondiale d'aliments a connu une croissance systématique et son offre par personne a augmenté de 24% au cours des 40 dernières années, passant de 2.360 à 2.803 calories journalières *per capita*, tandis que la population est passée de trois à six milliards de personnes [FAO apud Ricupero (2008)].

Cependant, sachant que la superficie de terres cultivables libres ou occupées de manière éparse (cf le début de ce chapitre) est considérée suffisante pour la production de volumes appréciables de biocarburants, et en particulier de bioéthanol de canne à sucre qui demande une superficie assez réduite, il faut admettre que des déséquilibres réels se sont produits entre l'offre et la demande de certaines céréales importantes pour la diète de nombreux pays, et que cette situation a été associée de manière simpliste à la production croissante de biocarburants.

En vérité, l'inflation élevée des prix des aliments s'inscrit dans une problématique complexe dans laquelle, outre l'expansion des marchés bioénergétiques et de la demande de matière première associée, interviennent également divers autres facteurs d'un poids beaucoup plus élevé. Du côté de la demande, il y eut une croissance remarquable de la consommation *per capita* de céréales et de protéines animales sur des marchés importants, en particulier en Asie (Inde et Chine), face à une offre déprimée par des problèmes conjoncturels (causés par des événements climatiques) et par des coûts plus élevés des intrants agricoles, sous les effets directs (opérations agricoles, transport et traitement) et indirects des prix élevés du pétrole, spécialement pour les fertilisants. Des facteurs aggravants sont venus s'ajouter, comme la dévaluation du dollar, les stocks réduits de divers produits et les manœuvres spéculatives dans le marché international des aliments. Quelques chiffres sont suffisants pour confirmer la gravité de ce scénario.

Un des principaux importateurs d'aliments dans l'actualité, avec environ 20% de la population mondiale et moins de 10% des terres cultivables, la Chine, a réussi pendant des décennies à maintenir un approvisionnement raisonnable en céréales grâce à ses propres ressources agricoles. Cependant, en raison de l'augmentation des revenus et de la diversification de la diète, qui augmenta la demande en protéines animales, les importations d'aliments ont progressé dans une proportion importante à partir de 2004. La demande *per capita* de viande en Chine, qui était de 20 kg par personne/an en 1985, est passée à 50 kg en 2000, avec des expectatives d'atteindre 85 kg en 2030 [SOW-VU (2007)], niveaux typiques des pays connaissant un développement moyen ou élevé. Cette demande en protéine animale a élevé de manière significative la demande en grains, étant donné que 5 à 8 kilos de ration (aliment concentré) sont nécessaires en moyenne pour produire un kilo de viande porcine ou bovine.

Pour ce qui concerne la seule participation brésilienne dans ce nouveau marché, en 2007, 11 millions de tonnes de soja ont été exportés en Chine, ce qui, pour une productivité moyenne nationale de 2,5 tonnes par hectare [Abiove (2008), signifie l'emploi de 4,4 millions d'hectares pour la culture de cette plante oléagineuse dans le but d'approvisionner le marché chinois : cette superficie est supérieure à celle des plantations de canne à sucre à des fins énergétiques au Brésil.

Comme indicateurs de l'inflation sur le marché international des *commodities* agricoles d'un intérêt alimentaire, entre 2000 et 2007, la montée des prix des céréales a été de 225%, donc, inférieure malgré tout à la croissance d'environ 330% des prix du pétrole durant la même période. L'augmentation des prix des aliments a repris de la force ces dernières années, spécialement pour certaines céréales importantes : de janvier 2007 à mars 2008, le maïs, le blé et le riz ont vu leurs prix monter de 40%, 130% et 82%, respectivement [Faostat (2008b)]. Cette évolution des prix sera mieux détaillée plus loin dans ce chapitre, Elle caractérise une situation de défi, dont l'impact est plus important sur les nation plus pauvres et dépendantes des importations d'énergie et d'aliments. Selon certaines perspectives, cette situation pourrait être le réflexe de changements structurels dans l'économie mondiale et elle pourrait se prolonger pendant de nombreuses années [World Bank (2008)].

La participation du bioéthanol de canne à sucre en tant que cause de ces déséquilibres et de ces mouvements de prix est absolument marginale, voir même nulle, en raison de la superficie réduite occupée. Comme indiqué au chapitre antérieur, la superficie utilisée pour la production de bioéthanol de canne à sucre, suffisante pour permettre la substitution de 10% de la consommation mondiale d'essence, est aujourd'hui de près de 23 millions d'hectares, l'équivalent de 1,5% de l'aire cultivée, ou 0,2% de l'aire cultivable de la planète. Cet argument se confirme en raison de l'impact limité de la production de bioéthanol sur les prix du sucre, qui se sont maintenus à des niveaux plus ou moins stables ces dernières années, en comparaison avec les autres produits agricoles, comme on le verra plus loin,

La même chose ne peut pas être affirmée pour les autres combustibles produits à base de biens alimentaires essentiels. Une étude du Fonds Monétaire International (FMI) sur la croissance de la demande en produits agricoles indique que le maïs, le soja et le colza verront leurs marchés fortement influencés par la production de bioénergie. Un bon exemple est celui de la production nord-américaine de bioéthanol, responsable de 60% de l'augmentation de la demande globale de maïs, ce qui affecte directement ses prix. En effet, les États-Unis, principal producteur et exportateur mondial de maïs, devront consacrer annuellement, d'ici à 2011, près de 30% de leur production à la fabrication de bioéthanol. De façon analogue, une augmentation de la production européenne de biodiesel tend à affecter le marché des huiles végétales [IMF (2007)].

Dans ce contexte, il est important de reconnaître que la production interne de biocarburants de basse productivité dans les contextes nord-américain et européen présente des limites évidentes, impliquant la mise à profit de créneaux de production, spécialement en cas

d'excédents agricoles, qui peuvent représenter un petit pourcentage de la consommation interne de combustibles liquides dans ces pays. Cette réalité ouvre une fenêtre d'opportunité pour la production rationnelle et durable de biocarburants dans le contexte de pays tropicaux humides de l'Amérique Latine et des Caraïbes, d'Afrique et d'Asie, ce qui pourrait permettre progressivement aux pays ayant une consommation énergétique élevée d'atteindre des taux de substitution bien plus élevés, de 20% à 30%, sans affecter de manière importante la production d'autres biens agricoles et avec un potentiel considérable de développement dans ces régions.

Ainsi, les impacts des biocarburants sont clairement différenciés selon leur origine. Tandis que le bioéthanol de canne à sucre produit dans le contexte de pays avec une productivité élevée, comme ceux situés dans les régions au climat adéquat, affecte peu la production d'autres biens agricoles, les biocarburants produits à grande échelle dans le contexte nord-américain et européen causent un impact direct et croissant sur la disponibilité en produits alimentaires. En outre, leur impact sur la demande de produits agricoles est aggravé par les pratiques protectionnistes largement adoptées par les pays industrialisés, avec de sérieuses implications, dans deux directions au moins. D'une part, le maintien de prix de protection pour leurs agriculteurs présuppose l'existence de barrières tarifaires qui rendent difficile ou empêchent l'accès de produits agricoles originaires des pays en développement aux marchés des pays industrialisés, décourageant la production pour l'exportation. D'autre part et de façon encore pire, les excédents de la production subventionnée déséquilibrent de manière perverse le marché mondial de biens agricoles, dégradant les prix internationaux et déstructurant la production d'aliments dans la majorité des pays aux revenus plus modeste.

Un exemple éloquent des conséquences des distorsions de prix sur le marché des biens agricoles est celui de la grande production de maïs aux États-Unis, avec des excédents exportés à des prix inférieurs aux coûts. Ceci a entraîné la réduction graduelle de sa culture chez les producteurs traditionnels de l'Amérique Latine, comme le Mexique, la Colombie et le Guatemala qui, malgré leur pratique millénaire de la culture de cette céréale, sont devenus dépendants de l'importation du produit nord-américain pour leur alimentation de base. Il faudra un certain temps pour que l'on coordonne de forme adéquate les politiques agricoles nationales et qu'elles s'harmonisent avec les demandes des politiques énergétiques, résolvant ainsi la crise actuelle. En ce sens, le rôle de politiques publiques pertinentes est essentiel pour le développement durable des biocarburants [Rodriguez (2008)].

Naturellement, les subventions à la production agricole peuvent être des instruments légitimes de politique publique. Cependant, une grande partie des US\$ 280 milliards (et plus) dépensées annuellement par les pays de l'OCDE dans le soutien à leurs agriculteurs, ce qui représentent en moyenne 30% du rendement brut de l'activité rurale [OCDE (2007b)], a servi à réduire de manière perverse la production d'aliments dans les pays en développement. La révision de ces subventions est un des thèmes les plus épineux de l'agenda du commerce international, mais elle doit être conduite d'urgence, comme condition fondamentale de la reprise de la rationalité dans la production agricole mondiale. Ce contexte s'étend aux

biocarburants, un secteur dans lequel de lourdes subventions bloquent le commerce international et justifient des systèmes productifs inefficients, qui finissent par gaspiller les biens alimentaires, avec de maigres bénéfices pour la réduction du changement climatique. En résumé, la sécurité alimentaire peut être affectée dans le cas où les biocarburants seraient produits de forme inadéquate, avec une basse productivité énergétique et en utilisant des ressources naturelles de forme irresponsable. Cependant, ceci n'est pas le cas du bioéthanol de canne à sucre.

Les autres dimensions de la sécurité alimentaire sont affectées de façon forte et évidente par la production des biocarburants. L'accès aux aliments, qui dépend primordialement des conditions de revenu de la population et de l'infrastructure de transport, de stockage et de distribution, tend à être favorisé dans les contextes où la production bioénergétique dynamise le système productif rural et augmente le revenu des familles. Mais, d'autre part, il sera peu affecté dans les autres contextes. Quant à l'utilisation de ressources primaires, comme mentionné dans la discussion antérieure sur la disponibilité des aliments, l'effet des biocarburants sur la sécurité alimentaire dépend des conditions dans lesquelles ils sont produits. Il est crucial de reconnaître la différence entre les productivités des alternatives actuellement mises en oeuvre, qui exercent un impact direct sur les terres et sur le volume de ressources naturelles destinées aux cultures, comme cela a été présenté au Chapitre 3 de cet ouvrage.

Finalement, la dimension de la stabilité pourra apparemment s'améliorer à nouveau, et chaque fois que sera prise en considération une production efficiente de biocarburants car les producteurs agricoles vont pouvoir compter sur d'autres marchés intéressants, qui agiront comme amortisseurs de la volatilité des prix. Un exemple concret est offert par le bioéthanol de canne à sucre au Brésil, dont la production a stimulé l'augmentation de la production de la canne, bien que cette matière première soit détournée en partie vers la fabrication de sucre chaque fois que son prix se montre suffisamment attractif. D'autre part, les prix qui motivent le bioéthanol face au sucre tendent à réduire l'offre de sucre et à stabiliser son prix. Ces impacts positifs sur la stabilité ont tendance à devenir plus notables quand les marchés bioénergétique et alimentaire se montrent plus intégrés et moins affectés par les barrières douanières.

En conclusion, les disponibilités en ressources naturelles de la planète sont amplement suffisantes pour une production bioénergétique durable en des volumes raisonnables, avec un impact réduit sur d'autres activités, à condition que soient adoptées des solutions technologiques rationnelles, comme le bioéthanol de canne à sucre qui, en raison de ses indicateurs différenciés, peut difficilement être associé à une crise de l'offre et de prix des aliments. En outre et de façon plus large, l'adoption de technologies plus efficaces, qui réduisent les pertes et optimisent les systèmes productifs de l'agriculture et de l'élevage, sera probablement un facteur encore plus important que la disponibilité en ressources naturelles pour limiter cette concurrence entre la production d'aliments ou de bioénergie (et d'autres produits agricoles non-alimentaires) dans l'affectation des terres et des autres ressources productives.

En effet, l'augmentation de la productivité offre une alternative immédiate à la demande croissante en produits agricoles provoquée par l'expansion indéniable de la bioénergie. Un bon exemple de ce processus de technification et de d'intensification est l'augmentation de la production de viande bovine et de lait au Brésil ces dernières années ; elle montre comment les zones de pâturage, entretenues de façon adéquate et cultivées avec des fourrages de meilleure qualité, peuvent supporter un nombre plus élevé d'animaux, libérant des terres pour d'autres finalités. A ce propos, les indicateurs des 20 dernières années sont significatifs : la superficie de pâturages dans les propriétés rurales brésiliennes s'est réduite de presque 4%, sur une période durant laquelle le cheptel s'est agrandi de 32% et la production laitière a augmenté de 67% [IBGE (2008)]. Analysant ce thème d'une autre manière, la densité moyenne de bovins dans l'élevage brésilien était, en 2005, approximativement d'une tête par hectare, tandis que dans l'État de São Paulo, cette densité atteignait 1,4 tête par hectare, soit 40% de plus. Si les fermes brésiliennes commençaient à travailler au niveau de productivité observé à São Paulo, de 50 millions à 70 millions d'hectares seraient libérés pour l'agriculture [Jank (2007)], comme déjà indiqué précédemment, ce qui représenterait deux à trois fois la superficie nécessaire pour produire assez de bioéthanol pour une addition de 10% de bioéthanol à l'essence de tous les pays.

Confirmant l'exposé ci-dessus, un groupe multidisciplinaire est arrivé récemment à un consensus [Best et al (2008)], à savoir que les augmentations récentes dans les prix des *commodities* agricoles peuvent être attribuées, dans leur majorité, à des facteurs qui ne sont pas en rapport avec la production de biocarburants. Comme principaux facteurs responsables de cette augmentation, cette étude a indiqué la demande croissante d'aliments et de rations pour animaux, la spéculation financière dans les marchés internationaux des produits alimentaires et les mauvaises récoltes causées par des événements climatiques extrêmes. En outre, les prix élevés du pétrole et les coûts relatifs élevés des fertilisants ont eu un impact considérable sur les prix internationaux des produits agricoles.

Modèles d'évaluation de l'impact de la production bioénergétique sur la sécurité alimentaire

Une des méthodes utilisées pour évaluer la viabilité de l'expansion de la production bioénergétique, au sens large, a été celle des modèles analytiques qui mettent en rapport les divers systèmes productifs et socio-économiques concernés avec leurs fonctions de production et de demande définies au moyen d'équations mathématiques, reflétant la base d'informations et de données existante. L'objectif de ces modèles est de simuler les effets de la production de biocarburants dans des contextes et scénarios définis au préalable, pour aider à la prise de décisions et à la mise en oeuvre de politiques dans le domaine de l'agriculture et de la bioénergie.

Une des plus importantes initiatives dans ce sens fut lancée par la FAO en 2007 : le Projet de Bioénergie et de Sécurité Alimentaire (Bioenergy and Food Security Project – BEFS) [FAO (2008c)], qui développe une structure analytique pour évaluer les connexions entre la bioé-

nergie et la sécurité alimentaire, en proposant un modèle à appliquer dans des pays spécifiques. Ce projet devrait contribuer au débat en cours actuellement en de nombreux pays, caractérisant les bénéfices et les problèmes associés à une utilisation plus large de la bioénergie. La Figure 30, exposée antérieurement, montre la synthèse d'un ample réseau d'interactions que l'on cherche à comprendre pour modéliser ce projet.

L'objectif de la structure analytique vise plus particulièrement à évaluer l'impact de différents schémas de production et d'utilisation bioénergétique sur la sécurité alimentaire, schémas qui sont spécifiques pour chaque pays. Le point central de l'analyse entre la bioénergie et la sécurité alimentaire est le changement de revenu et de prix des produits de l'agriculture et de l'élevage. Ces changements dépendent principalement des variations des modèles d'utilisation de la terre, des niveaux de production de bioénergie et d'aliments et des prix du marché des aliments et de l'énergie. Après la sélection d'un scénario déterminé dans un pays, en spécifiant les contextes productifs et les demandes pour les aliments, la bioénergie et d'autres produits agricoles, cinq étapes sont nécessaires pour la réalisation de l'analyse :

- i) détermination du « potentiel technique » pour la bioénergie, au moyen du modèle commenté au début de ce chapitre [Smeets et al. (2006)] ;
- ii) estimation de coût pour l'offre d'aliments et de bioénergie ;
- iii) estimation des « potentiels économiques » pour la bioénergie ;
- iv) estimation des impacts macroéconomiques de la production bioénergétique sur le revenu, l'emploi et les prix ; et
- v) évaluation de l'impact des changements dans le revenu, le prix et l'emploi dans la sécurité alimentaire.

L'intention est d'évaluer de forme désagrégée les différents groupes de populations qui peuvent être affectés par le développement de la bioénergie et dont la croissance dans le pays étudié dépend du scénario choisit. Des études-pilotes de ce projet sont actuellement mises en oeuvre au Pérou, en Tanzanie et en Thaïlande, avec des perspectives d'expansion en d'autres pays.

D'autres modèles similaires et d'une moindre complexité ont été présentés, comme dans les études réalisées par l'Institut International de Recherche de Politique Alimentaire (International Food Policy Research Institute – IFPRI) et par le Département d'Agriculture du gouvernement nord-américain (United States Department of Agriculture – USDA). Dans le cas du IFPRI, le Modèle International pour l'Analyse de Politique de Commodities et de Commerce Agricole (International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade – Impact), fut utilisé pour évaluer les conditions futures de l'offre et de la consommation d'aliments et de sécurité alimentaire pour l'année 2020 et les années suivantes, en pre-

nant en considération trois catégories de demande – alimentation humaine, rations animales et autres utilisations –, ajustées en fonction des biocarburants. Les matières premières prises en considération furent le maïs, la canne à sucre, la betterave, le blé et le manioc, pour la production de bioéthanol, et le soja et d'autres semences oléagineuses, pour le biodiesel. Sur base des projections de demande de biocarburant pour les pays et régions considérés, la production de biocarburant, dans ce modèle, a été considérée selon trois scénarios de productivité et de technologies.

Parmi les principales conclusions de cette étude, signalons une augmentation significative des prix des produits agricoles, spécialement du manioc, surtout quand la productivité agro-industrielle est basse, ce qui confirme l'importance de développer la bioénergie selon une norme d'efficacité [IFPRI (2006)].

Le modèle utilisé par la USDA pour évaluer les prix agricoles face à l'expansion de la production de biocarburants, modèle développé par le Service des Études Économiques (Economic Research Service – ERS) de cet organisme, présente un tableau un peu différent, dans lequel le profil de la demande (avec l'augmentation de la demande de protéines animales), les effets climatiques et les prix de l'énergie jouent un rôle plus significatif que la bioénergie sur l'augmentation des prix. Dans ce cas, cette étude indique que seulement 3% de l'inflation observée dans les prix du maïs seraient dû à la production de bioéthanol et que les prix élevés du pétrole en seraient la cause la plus importante. L'évolution des prix entre 1992 et 2008 indique que le pétrole a augmenté de 547%, les *commodities* (surtout les métaux) ont augmenté de 286%, en général, et les aliments ont augmenté de 98%, en estimant qu'au long des prochaines années le marché s'équilibrera à des niveaux plus adéquats [ERS (2008)].

La différence marquée de visions entre les deux modèles antérieurs indique une fragilité inévitable de l'approche par les modèles mathématiques, associée à la difficulté de simuler des systèmes complexes, sous des conditions transitoires en permanence et avec des comportements typiquement stochastiques. La solution habituelle a consisté à élargir la complexité des modèles utilisés, en augmentant le nombre de variables et en exposant comme contrepartie une carence chronique de données suffisamment détaillées pour que le modèle conçu puisse être calibré de façon adéquate et mis en oeuvre. Ainsi est maintenue une vision statique de la réalité, ce qui limite assez bien sa portée dans le temps et la robustesse de ses indications dans des contextes plus variés. Cependant, de tels modèles sont des outils d'intérêt réel, car ils compensent leur faible capacité de prédiction par une application effective comme outil exploratoire de scénarios, probablement de forme plus qualitative que quantitative. En temps opportun, des modèles plus élaborés pourront être développés, incorporant des logiques adaptatives, et capables de simuler de manière dynamique les interactions entre les systèmes socio-économiques et la bioénergie.

Évolution des prix internationaux d'intérêt pour le binôme aliments-bioénergie

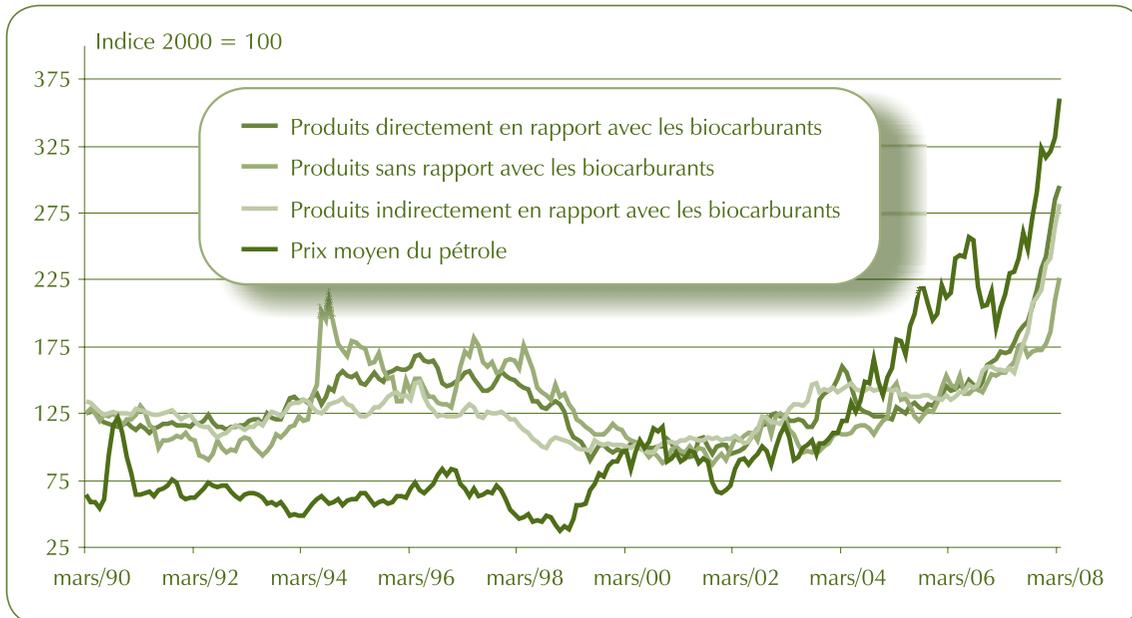
Dans le but de donner d'avantage de consistance à la discussion importante sur les rapports entre la production de biocarburants et la disponibilité en aliments, et aussi pour chercher à caractériser d'éventuelles corrélations entre les prix des différents groupes de produits, l'Unité de Développement Agricole de la Cepal a élaboré, sur base de données de la Banque Mondiale, diverses figures qui résument l'évolution des prix internationaux les plus importants entre mars 1990 et mars 2008. Ces figures sont présentées ci-après, en partant d'un cas plus général et en cheminant dans le sens de comparaisons plus spécifiques. Ont été prises en considération les différentes catégories de produits agricoles commercialisés au niveau international (*commodities*), regroupés suivant leur rapport direct, indirect ou inexistant avec la production de biocarburants. Comme exemples de produits du premier groupe, il y a le sucre, (qui suit le prix de la canne à sucre), le maïs, l'huile de soja et l'huile de palme, tandis que dans le second groupe, se trouvent la viande et le blé, et dans le dernier groupe, le cacao, le café arabica et robusta, le thé et les bananes. Ces graphiques ne prétendent pas démontrer des rapports de cause à effet, mais bien constater et évaluer la corrélation croissante entre le comportement des prix sur les marchés internationaux du pétrole et celui des produits agricoles, ce qui peut être expliqué par diverses raisons, entre autres, l'expansion de la bioénergie.

Le Graphique 41 illustre l'évolution des indices de prix du pétrole brut et de trois indices simples de prix de produits agricoles, groupés selon les indications du paragraphe antérieur. Depuis le début de l'année 2002, plus ou moins, les prix de tous les produits agricoles ont suivi la tendance générale déterminée par le pétrole brut, tendance qui devint plus claire à partir de mars 2007, quand les matières premières qui sont directement ou indirectement en rapport avec le biocarburant commencèrent à croître à un taux assez similaire à celui du pétrole brut, et à un rythme bien plus rapide que celui des produits sans rapport avec les biocombustibles.

Le Graphique 42 fait la distinction entre les produits associés au biodiesel (huiles végétales, de soja et de palme) et au bioéthanol (sucre et maïs). Les deux groupes de produits montrent une tendance d'élévation des prix depuis le début de 2002, mais, durant les deux dernières années, les prix des matières premières en rapport avec le biodiesel sont montées à un rythme bien plus rapide que les produits associés au bioéthanol, se rapprochant assez bien du taux de croissance des prix du pétrole brut.

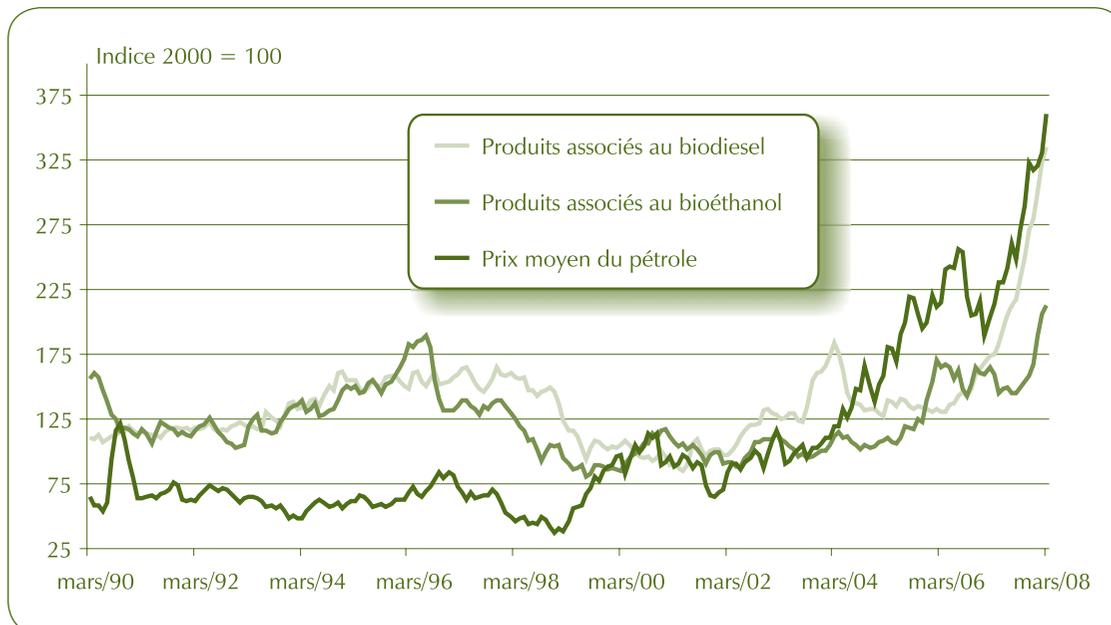
Au Graphique 43, les produits associés directement au bioéthanol sont détaillés. Il est intéressant d'observer que les prix du maïs et du sucre, les deux *commodities* en rapport avec le bioéthanol incluses dans cette analyse, ont évolué dans des directions opposées, spécialement depuis 2002 et jusqu'au milieu de 2007. Depuis lors, les deux prix ont augmenté de manière constante, en suivant la croissance des prix du pétrole brut.

Graphique 41 – Indices de prix pour le pétrole brut et les produits agricoles (Moyenne 2000 = 100)



Source : Cepal (2008).

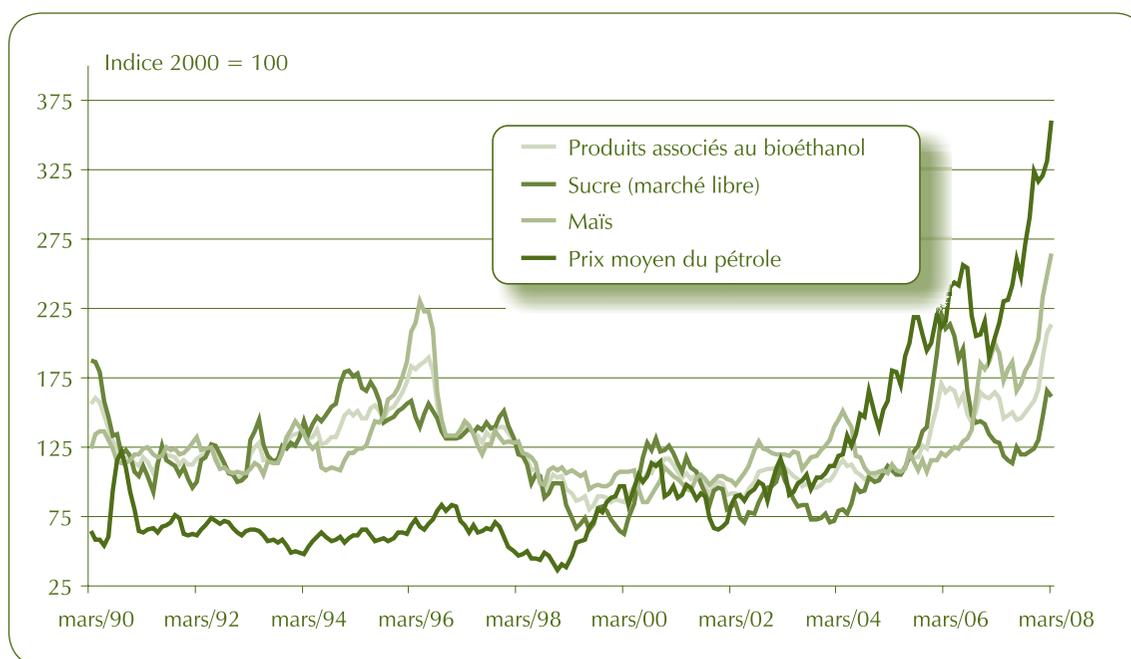
Graphique 42 – Indices de prix pour le pétrole brut et les produits agricoles associés au bioéthanol et au biodiesel (Moyenne 2000 = 100)



Source : Cepal (2008).

Le prix du pétrole brut a atteint un sommet en juillet 2006, et chuta jusqu'en janvier 2007 et depuis lors, il a augmenté à un taux constant. Les prix du sucre et du maïs ont commencé à baisser après ce pic, mais la réduction fut plus significative et dura plus longtemps pour le sucre que pour le maïs. Plus récemment, les prix des deux produits augmentèrent à nouveau, accompagnant l'escalade des prix du pétrole brut qui commença en février 2007, mais avec un retard : la reprise de la montée des prix eut lieu en mai 2007, pour le maïs, et en octobre 2007, pour le sucre. Cependant, l'augmentation fut bien plus importante dans le cas du maïs, qui atteignit son prix moyen mensuel le plus élevé en mars 2008, 14,4% plus élevé que le pic historique antérieur, en mai 1996. A son tour, le prix moyen du sucre, en mars 2008, se situa 27% au-dessous du niveau atteint lors du pic historique de février 2006. En d'autres mots, le prix du sucre, qui est corrélé directement avec le prix de la canne à sucre, a augmenté bien moins que celui du maïs.

Graphique 43 – Indices de prix pour le pétrole brut et les produits agricoles associés au bioéthanol
(Moyenne 2000 = 100)



Source : Cepal (2008).

Pour conclure l'exploration du comportement des prix, et en guise de confirmation des constatations antérieures, le Tableau 42 résume le rapport entre l'évolution des prix du pétrole et les prix des produits agricoles liés directement aux biocarburants. En fonction de ces données, leur corrélation devient évidente au cours du temps, d'une manière générale.

Ce tableau utilise le coefficient de corrélation simple, paramètre statistique qui, au fur et à mesure que l'on s'approche de l'unité, indique combien cette corrélation devient plus forte et plus positive. Des valeurs nulles indiquent une absence de corrélation, et des valeurs négatives signifient une corrélation négative, c'est-à-dire que les comportements divergent. D'après les valeurs du Tableau 42, pour le bioéthanol, il existe des différences importantes entre le maïs et le sucre, et dans le cas du biodiesel, il y a un changement dans le rapport entre ses prix et les prix du pétrole dans la décennie de 1990, durant laquelle le rapport fut faible et négatif, et il y eut ensuite un rapport fort et positif après 2000, se renforçant plus encore après 2005.

Tableau 42 – Coefficients de corrélation simple entre les prix du pétrole et les prix des produits associés directement aux biocarburants, entre janvier 1990 et mars 2008

| Produit | Période | | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1990 à 2008 | 1990 à 1999 | 2000 à 2008 | 2005 à 2008 |
| Maïs | 0.43 | 0.04 | 0.76 | 0.74 |
| Sucre | 0.21 | 0.03 | 0.68 | 0.22 |
| Huile de soja | 0.61 | -0.41 | 0.82 | 0.89 |
| Huile de palme | 0.42 | -0.44 | 0.81 | 0.86 |

Source : Cepal (2008).

Comme indiqué aux Graphiques 41, 42 et 43 et au Tableau 42, il existe une corrélation claire entre les prix du pétrole et ceux des produits agricoles en rapport avec les biocarburants, bien qu'à des niveaux bien plus bas dans le cas du sucre, associé à la canne à sucre, que pour les autres intrants du bioéthanol. Au fur et à mesure que la recherche dans ce domaine prendra de l'ampleur et que d'avantage de données seront disponibles, le débat international deviendra plus riche et les diverses influences sur les prix mondiaux des aliments deviendront toujours plus claires, réduisant ainsi les spéculations dans ce domaine.

8.6 Facteurs d'induction pour un marché global de bioéthanol

Dans une large perspective, l'adoption du bioéthanol comme composant de la matrice énergétique mondiale est associée à quelques facteurs qu'il convient de mentionner, en raison de leur importance propre et de leur signification croissante dans l'ensemble des motivations qui soutiennent ce biocarburant. Le présent chapitre a cherché à montrer l'existence de potentiels productifs robustes, de demandes croissantes et de marchés en phase de consolidation,

avec des impacts délimités sur la disponibilité des aliments et sur leurs prix. Des paragraphes antérieurs, il faut retenir également la grande importance des actions de l'État, comme encadrant de ce processus, pour potentialiser ses avantages et atténuer ses risques dans l'intérêt majeur de la société. C'est exactement dans ce domaine qu'il convient d'insérer quelques commentaires sur les thèmes relatifs au rôle du bioéthanol de canne à sucre dans l'agenda environnemental mondiale et dans les négociations internationales visant à fortifier le commerce entre les pays.

Les défis environnementaux globaux et le bioéthanol

Les biocarburants, comme le bioéthanol, ont fait l'objet de discussions explicites dans les négociations globales relatives à l'environnement, principalement lors de la Convention sur la Diversité Biologique (Convention on Biological Diversity – CBD) et de la Convention-cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique. Sont résumés ci-après les points les plus importants de ces négociations.

Dans le cadre de la Convention sur la Diversité Biologique, les biocarburants ont fait l'objet d'une recommandation spécifique de la 12^{ème} session du Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice (SBSTA), ou Organisme Auxiliaire pour le Conseil Scientifique, Technique et Technologique, de cette convention [CBD (2008)]. Cette recommandation concerne les aspects positifs et négatifs de la production de biocarburants liquides et leur utilisation pour la « biodiversité et le bien-être humain » ; elle indique que les effets bénéfiques surgissent lorsque leur production et leur utilisation sont associées, entre autres aspects, à la réduction de la consommation de combustibles fossiles ; à la réduction dans l'utilisation de la terre à des fins agricoles associée à l'augmentation de la production d'énergie ; à la diminution de l'utilisation de l'eau dans les plantations ; à la réduction dans la conversion de terres agricoles pour d'autres finalités ; et à l'augmentation du revenu et des opportunités économiques dans les zones rurales.

D'autre part, la même recommandation indique que les effets négatifs surgissent quand l'utilisation et la production de biocarburants sont associées à : la perte la fragmentation et la dégradations de biômes de valeur, comme les forêts naturelles, les champs, les marécages et les terres tourbeuses et d'autres dépôts de carbone, leurs composants de biodiversité, avec la perte des services essentiels des écosystèmes et des augmentations dans les émissions de gaz à effet de serre dues à ces changements ; la concurrence à l'égard de la terre, avec des plantations alternatives, notamment la terre administrée par des communautés indigènes et des petits agriculteurs, et la concurrence avec la production d'aliments, qui peut conduire à l'insécurité alimentaire, l'augmentation de la consommation d'eau, une utilisation accrue de fertilisants et de pesticides, l'augmentation de la pollution de l'eau et de l'eutrophisation, la dégradation et l'érosion du sol ; la culture sans contrôle, l'introduction et la dissémination d'organismes génétiquement modifiés ; l'introduction sans contrôle et la dissémination d'espèces étrangères ; et les émissions liées au brûlis de biomasse, avec de possibles effets adverses pour la santé humaine.

De cette manière, les recommandations de la CBD/SBSTA convergent vers de nombreux thèmes relatifs à la durabilité de la production de bioéthanol de canne à sucre discutés aux chapitres précédents, comme ceux se référant aux bilans d'énergie et d'émissions (locales et globales), aux impacts sur les ressources naturelles, à la diversité biologique, à la production agricole, à l'utilisation de la terre et aux critères sociaux.

Dans le contexte des forums de la Convention-cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique, les biocarburants ont été discutés du fait de leur rapports importants avec le changement climatique et avec les émissions de gaz à effet de serre, découlant de l'utilisation du combustible et des activités de reboisement/déboisement, du changement de l'utilisation de la terre et d'autres adaptations et réductions dans les altérations du climat [UNFCCC (2008)]. Le Protocole de Kyoto, découlant de cette convention, établit des objectifs et des engagements pour les pays industrialisés, en ce qui concerne la réduction des émissions, en identifiant des mécanismes qui permettent à ces pays d'acquérir et de commercialiser des crédits d'émissions, à l'aide de projets implantés en des pays en développement, qui peuvent les utiliser pour accomplir leurs engagements. Citons entre autres le Mécanisme de Développement Propre (MDP), dont les projets doivent être associés aux objectifs de développement durable, impliquant des activités qui n'auraient pas été réalisées d'une autre manière, et qui permettent d'obtenir des réductions réelles et mesurables des émissions.

Les deux types de projets les plus communément présentés sont en rapport avec l'utilisation de la terre et la production d'énergie, ce qui confirme le potentiel de projets visant la production et l'utilisation de bioéthanol, encore peu exploité. Cependant, il existe des exemples de divers projets MDP en cours ou en phase de planification, relatifs à la bioénergie, avec des informations disponibles sur les méthodologies à employer pour le calcul de la réduction des émissions [CDM (2008)], comme cela a été commenté antérieurement dans ce livre, pour la cogénération à l'aide de la bagasse de canne.

Il est certain qu'un marché de bioéthanol en expansion, administré sur base de critères de durabilité, doit contribuer à permettre aux pays producteurs et consommateurs de ce biocarburant d'atteindre leurs objectifs assignés par les accords environnementaux internationaux.

Le Commerce international du bioéthanol

Comme cela a déjà été observé dans ce chapitre, il existe des défis importants associés à la formation d'un marché international pour le bioéthanol. Par exemple, des mesures douanières à caractère protectionniste et des standards de qualité déséquilibrés peuvent affecter les opportunités des pays en développement, producteurs potentiels, dans leur accès au marché international de bioéthanol ; il en est de même pour les mesures restrictives qui recherchent exclusivement l'augmentation de la production dans les pays industrialisés. La préoccupation existe aussi que l'augmentation des tarifs sur les biocarburants dans les marchés des pays industrialisés oblige les pays en développement à exporter des intrants, comme des chaînes sucrées et des huiles végétales à l'état brut, laissant au pays importateur la phase industrielle

de la production des biocarburants, avec les bénéfices associés à cet ajout de valeur. Comme exemple de politiques protectionnistes, les barrières tarifaires actuelles, comme la taxe *ad valorem* de 6,5% sur les importations de biodiesel dans l'Union Européenne, et le tarif de 0,54 US\$/gallon (0,142 US\$/litre) sur l'éthanol importé aux Etats-Unis, restreignent le commerce des pays en développement avec quelques-uns des plus importants marchés consommateurs pour la bioénergie.

Quelques accords et initiatives de promotion de commerce préférentiel de l'Union Européenne et des États-Unis ont été développés ces dernières années, cherchant à offrir des opportunités pour que les pays exportateurs potentiels de bioéthanol puissent bénéficier de l'augmentation de la demande globale de biocarburants. Dans cette perspective, le commerce préférentiel de l'Union Européenne avec des pays en développement s'encadre dans le Generalised System of Preferences (GSP), ou Système Généralisé de Préférences des pays européens, et c'est dans ce contexte que se situe l'initiative Everything But Arms (EBA), ou Tout, Sauf les Armes, et l'Accord de Cotonou (successeur de la Convention de Lomé), qui affectent directement le secteur du bioéthanol. D'après le GSP actuel, en vigueur jusqu'au 31 décembre 2008, l'accès à l'Union Européenne avec exemption de tarifs est offert à l'alcool dénaturé ou non dénaturé, pour les pays signataires. Le GSP comporte également un programme d'encouragement aux producteurs et exportateurs d'éthanol qui adhèrent aux principes de développement durable et de la bonne gouvernance [European Commission (2005)]. L'initiative du EBA offre aux pays moins développés l'accès en exemption de tarifs et de quotas pour les exportations d'éthanol, alors que l'Accord de Cotonou offre le libre accès à certaines importations en provenance de pays à bas revenu d'Afrique, des Caraïbes et de la région du Pacifique. D'une forme similaire, l'Accord Euro-Méditerranée (Euro-Mediterranean Agreement) comporte également des dispositions pour le commerce préférentiel de biocarburants pour certains pays du Moyen Orient et du Nord de l'Afrique.

Aux États-Unis, comme il a déjà été vu, l'éthanol peut être importé sans tarifs, au départ de certains pays des Caraïbes, via l'Initiative du Bassin des Caraïbes (Caribbean Basin Initiative), bien qu'il existe des restrictions spécifiques (quantitatives et qualitatives), selon le pays d'origine de la matière première (cf antérieurement). Des dispositions ont été proposées également pour les importations d'éthanol en franchise, dans les Négociations Commerciales de Libre Commerce entre l'Amérique Centrale et les États-Unis [Yacobucci (2006)]. Bien que ces accords n'altèrent pas le cadre général de restrictions au commerce de biocarburants, elles représentent des exceptions salutaires, et doivent être mises en valeur.

Les questions-clé pour la promotion du commerce international de bioéthanol incluent : la classification à des fins tarifaires des produits biocarburants comme biens agricoles, industriels ou environnementaux ; le rôle des subventions dans l'augmentation de la production ; et la compatibilité entre les diverses mesures prises dans le contexte interne de chaque pays et les exigences de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC). Sachant que l'agro-industrie des biocarburants n'existait pas quand les règles actuelles de l'OMC furent élaborées, les biocarburants ne sont pas inclus dans le système de classification HS (Harmonized Standard

ou Norme Harmonisée). Ceci crée des incertitudes, car c'est cette norme qui caractérise les produits dans le cadre des accords spécifiques de l'OMC. Par exemple, le bioéthanol est considéré comme un produit agricole et, par conséquent, il est inclus dans l'Annexe 1 de l'Accord sur l'Agriculture (AoA), ou Accord sur l'Agriculture, de l'OMC, tandis que le biodiesel est considéré comme un produit industriel et, de la sorte, il n'est pas soumis aux règles du AoA.

Certains membres de l'OMC ont suggéré que les combustibles renouvelables, y compris le bioéthanol, devraient être classés comme « produits environnementaux » et ainsi, seraient objet de négociations dans le groupe de « Produits et Services Environnementaux » [Steenblik (2005)]. Dans ce contexte, dans les comités pour le développement du cycle de Doha, promu par l'OMC en vue de diminuer les barrières commerciales dans le monde entier, des négociations ont été entamées sur « la réduction ou, selon ce qui sera approprié, l'élimination de barrières tarifaires ou non tarifaires, pour les biens et services environnementaux » mais les discordances continuent d'exister à propos de l'identification des produits environnementaux, de l'objectif et de la méthodologie à utiliser dans la libération du commerce de ces produits et des mécanismes destinés à mettre à jour régulièrement la liste de produits.

Les biocarburants continueront à représenter un facteur important dans les tractations du Cycle de Doha. Certains analystes ont suggéré qu'en raison de leur impact sur les marchés agricoles, les biocarburants peuvent sauver les négociations sur le commerce agricole, qui sont promues avec difficulté par l'OMC [Turner (2006)]. D'autres sont plus pessimistes et considèrent que

les nouvelles opportunités commerciales ouvertes dans les pays industrialisés, ayant un grand intérêt pour les biocarburants, ne seront probablement pas protégées par le système basé sur les règles de l'OMC, mais seront soumises à une forme moins fiable de décisions unilatérales d'un pays pour permettre que les importations répondent à une demande interne déterminée [IIED (2007)].

Dans ce schéma, un tarif pourrait continuer d'exister, mais il ne serait pas appliqué, ou un tarif plus bas serait appliqué pour un volume déterminé d'importations, avant que le tarif maximum ne soit appliqué. De la sorte, au cas où il serait possible de prouver que les importations sont sensibles politiquement, par exemple, si les producteurs ou les usines locales ont subi des menaces, ou si les standards environnementaux existant dans la production du biocarburant importé ont été considérés inadéquats par les consommateurs, les frontières pourraient se fermer à nouveau, sans possibilité de recours pour le pays ou pour l'entreprise exportatrice.

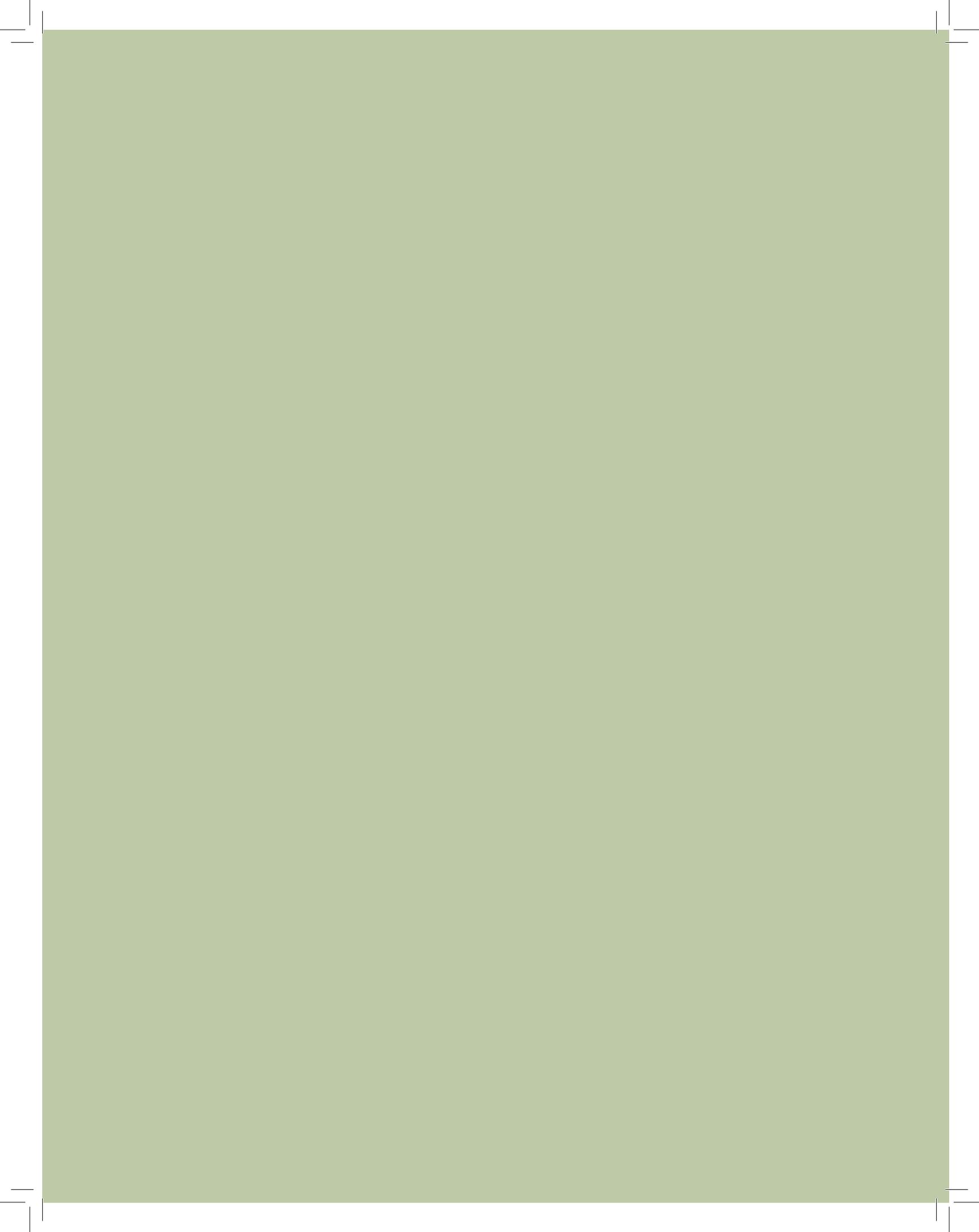
Les conditions qui entourent le Cycle de Doha reproduisent bien les difficultés pour les négociations globales dans la construction d'un marché sain pour les biocarburants, et c'est dans ce contexte que les pays producteurs doivent prendre des décisions et définir des stratégies pour le soutien à apporter au bioéthanol, en vue de répondre de façon adéquate aux pers-

pectives de développement et aux demande d'énergie, de l'agriculture et du commerce. Ces stratégies devront être évaluées à la lumière des bénéfices économiques, de l'équité de ces bénéfices, des limites environnementales, des bilans énergétiques nationaux et des opportunités internationales de commerce, en prenant en considération l'entrée dans un futur marché international de bioéthanol ou en accordant la priorité à l'utilisation du bioéthanol national pour le développement rural et pour la fourniture d'énergie à usage domestique.

Ces décisions dépendront principalement de la perspective adoptée par un pays sur le bioéthanol. Une vision à court terme de la part des producteurs et des acheteurs augmenterait l'attention sur les exportations et la garantie de l'approvisionnement énergétique, tandis qu'une vision à long terme pourrait donner la préférence à l'égalité sociale dans le développement rural et aux bénéfices environnementaux pour le monde. Cependant, il est important de noter que les marchés nationaux peuvent préparer le chemin pour le commerce international, en installant l'infrastructure nécessaire et en fournissant l'expérience de la gestion des systèmes productifs des biocarburants.

Dans tous les cas, il est fondamental de reconnaître que, dans la proposition de programmes ambitieux de production et d'utilisation de biocarburants, en particulier le bioéthanol, dans des pays où cette technologie énergétique n'existe pas encore, il est impératif que soient réalisées des évaluations et des études préalables suffisamment détaillées et complètes, pour que soient établis des objectifs cohérents avec les ressources existantes. La bioénergie n'est certainement pas une panacée, car elle ne répondra pas, à elle seule, à la demande énergétique du monde moderne, et ses avantages se réalisent dans des contextes spécifiques, comme cela a été présenté à diverses reprises dans ce travail. Il est possible que la meilleure recommandation à ce sujet soit de promouvoir le regroupement des connaissances et de procéder à une analyse précise des implications énergétiques, environnementales, économiques et sociales.

En guise de conclusion, il est certain que le marché mondial du bioéthanol devra devenir une réalité d'ici peu d'années. Sa magnitude et sa portée dans les pays dépendront de divers éléments encore en phase de conception, comme les décisions politiques des pays par rapport à leurs marchés internes, les discussions sur les critères de durabilité, les négociations sur le commerce international et la réaction de la société civile dans les pays en développement et dans les pays industrialisés, tout cela composant une équation complexe et dynamique. Sans aucun doute, le bioéthanol a un potentiel global et à ce titre il requière une coopération mondiale.





Chapitre 9

**Une vision de l'avenir pour le
bioéthanol combustible**

La société moderne doit affronter l'accélération de la dégradation environnementale en même temps qu'elle se rend compte de l'existence de limites dans les réserves de ressources naturelles, que ce soit l'énergie, l'eau ou les métaux. Dans ce contexte, l'énergie joue un rôle central, et oblige à repenser d'urgence les bases d'un modèle d'approvisionnement qui montre des signes d'épuisement et à rechercher de nouvelles ressources qui permettent d'assurer la continuité des dynamiques de développement socio-économique. Solution « lumineuse » dans ce sombre panorama, le soleil, source de tant d'énergies, regagne de son éclat car il représente encore une des rares ressources sous-utilisées par l'humanité. En effet, une fraction seulement de la radiation solaire touchant la planète est actuellement employée via des procédés technologiques. Il existe un énorme potentiel pour son utilisation, celle-ci présupposant cependant des solutions efficaces et compétitives pour être viabilisée. Dans ce contexte, la bioénergie apparaît comme une des meilleures alternatives pour capter et stocker l'énergie solaire, là où existent des terres libres, un climat adéquat (lumière, eau et température) et, tout aussi important, des connaissances suffisantes et des dispositions entrepreneuriales adaptées. Dans ce contexte, il est opportun de rappeler la réflexion visionnaire de Henry Ford, publiée en 1934 :

I foresee the time when industry shall no longer denude the forests which require generations to mature, nor use up the mines which were ages in the making, but shall draw its raw material largely from the annual products of the fields. I am convinced that we shall be able to get out of the yearly crops most of the basic materials which we now get from forest and mine [Modern Mechanix (1934)].¹

Spécialement adaptée à l'approvisionnement en combustibles des véhicules, l'énergie solaire sous la forme de bioéthanol, captée avec efficacité et durabilité, se distingue entre toutes les énergies renouvelables disponibles, et est capable de répondre aux demandes urgentes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'amélioration de la qualité de l'air dans les métropoles et de compétitivité économique avec les énergies conventionnelles. En outre, cette solution peut constituer une nouvelle dynamique agro-industrielle pour les pays tropicaux ayant des terres disponibles et étant disposé à dépasser les schémas énergétiques centralisés et problématiques au niveau de l'environnement, obtenant ainsi leur sécurité énergétique tout en s'offrant de nouvelles perspectives de croissance économique.

Les pages précédentes ont eu pour objectif de montrer, avec les détails et les explications possibles dans un tel type de document, comment la production de bioéthanol de canne à sucre, associée à la production d'énergie électrique et à la production d'aliments et de biomatériaux, présente des indices particulièrement intéressants de productivité et constitue, actuellement, la meilleure alternative disponible pour utiliser le travail, la terre, l'eau et le soleil dans la production de biocarburants. Il a également été montré comment cette alternative énergétique dispose encore d'un bon potentiel d'amélioration, par

¹ « Je prévois le moment où l'industrie ne déboisera plus des forêts qui ont demandé des générations pour croître, et n'utilisera plus les produits minéraux qui se sont formés durant des ères, mais elle cherchera sa matière première en grande partie à partir des récoltes agricoles. Je suis convaincu que nous serons capables d'obtenir de l'agriculture la majeure partie des matériaux de base que nous tirons actuellement des forêts et des mines. »

la mise en valeur des sous-produits et la rationalisation des processus agro-industriels, qui pourront, au cours des années à venir, dépasser les dix mille litres d'éthanol par hectare tout en présentant une demande énergétique exogène réduite et des émissions de gaz à effet de serre de l'ordre d'un dixième de la valeur correspondant aux dérivés du pétrole, pour le même gain énergétique final.

L'expérience brésilienne dans ce domaine – étalée sur nombreuses décennies et avec son historique d'erreurs et de réussites, incluant des centaines d'unités productrices et des millions de véhicules fonctionnant normalement, en utilisant un combustible qui, peu de mois auparavant, n'était encore que de l'eau, du gaz carbonique dans l'atmosphère et de la lumière du soleil sur les feuilles de canne – peut et doit être une référence pour d'autres pays et pour des contextes similaires. De nombreux pays peuvent adopter des programmes bioénergétiques efficaces, en adaptant l'exemple du Brésil à leurs caractéristiques, leurs potentiels et leurs marchés, mais apparemment, ils hésitent encore et doutent qu'il puisse exister des solutions aussi intéressantes.

De même, beaucoup de pays ont cherché à réduire leur dépendance énergétique, à atténuer leurs émissions de carbone et à améliorer la qualité de l'air de leurs villes, mais de manière générale, ils n'incluent pas l'utilisation du bioéthanol de canne à sucre parmi leurs alternatives, élevant des barrières qui protègent des solutions peu efficaces et non durables. Il y a certainement eu beaucoup de désinformation et une connaissance limitée des potentialités du bioéthanol de canne à sucre, même chez les décideurs chargés des thèmes énergétiques et environnementaux. Un des principaux objectifs du présent travail fut justement de mettre à disposition une information plus consistante et objective sur ce biocarburant.

En résumé, soulignons les caractéristiques les plus importantes du bioéthanol de canne à sucre, concrètement vérifiées et bien documentées durant plusieurs décennies au Brésil, qui font de ce biocarburant, une option énergétique durable, passible d'être reproduite et adaptée à d'autres pays disposant de terres et de conditions édaphoclimatiques adéquates :

1

Le bioéthanol peut être utilisé dans les moteurs automobiles, pur ou mélangé avec de l'essence, avec un bon rendement et en employant essentiellement le même système de distribution et de stockage existant pour l'essence. Avec des teneurs allant jusqu'à 10%, les effets du bioéthanol sont presque imperceptibles sur la consommation des véhicules, qui peuvent, à ces niveaux, utiliser ce biocarburant dans leurs moteurs sans aucune modification.

2

Le bioéthanol de canne à sucre est produit avec une haute efficacité dans la captation et la conversion d'énergie solaire (rapport production/consommation d'énergie au-dessus de 8), avec une productivité agro-industrielle assez supérieure à celle des autres biocarburants, atteignant près de huit mille litres par hectare (avec les technologies actuelles) et une disponibilité significative d'excédents d'intérêt énergétique, comme les biocarburants solides (bagasse et paille) et, principalement, la bioélectricité.

3

Le bioéthanol de canne à sucre, produit dans les conditions brésiliennes, est compétitif vis à vis d'un pétrole à environ US\$ 45 le baril, avec un coût de production déterminé principalement par la matière première. La technologie employée pour sa production est accessible et disponible et peut être insérée progressivement dans une agro-industrie de la canne à sucre dédiée à la production de sucre.

4

Les impacts environnementaux à caractère local, associés à la production de bioéthanol de canne à sucre, sur les ressources hydriques, le sol et la biodiversité et découlant de l'utilisation de produits pesticides, entre autres, peuvent être et, en bonne partie, furent effectivement atténués et ramenés à des niveaux tolérables, inférieurs à la majorité des autres cultures agricoles.

5

L'utilisation de l'éthanol de canne à sucre permet de réduire de presque 90% les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi de manière effective à l'atténuation du changement climatique. Dans les conditions actuelles, pour chaque million de mètres cubes de bioéthanol de canne à sucre employé dans les mélanges avec l'essence, près de 1,9 million de tonnes de CO₂ cessent d'être émises dans l'atmosphère.

6

Les perspectives de développement technologique dans l'agro-industrie du bioéthanol de canne à sucre sont significatives, avec une augmentation de la productivité et du rendement énergétique (y compris durant l'étape agricole) et une diversification de la gamme de produits, en particulier par les technologies d'hydrolyse et de gazéification, passibles d'être employées dans l'augmentation de la production de bioéthanol et de bioélectricité. Le développement adéquat de programmes bioénergétiques dépend fondamentalement de son interaction permanente avec les sources d'innovation.

7

L'emploi créé dans l'agro-industrie du bioéthanol de canne à sucre présente de bons indicateurs de qualité et, bien que la mécanisation croissante de la récolte de la canne à sucre réduise le travail manuel, la demande en main-d'oeuvre demeure assez élevée par unité d'énergie produite, en comparaison avec les autres sources d'énergie.

8

La production de bioéthanol de canne à sucre, telle qu'elle est développée au Brésil, affecte peu la production d'aliments, avec une superficie plantée très réduite par rapport à la superficie cultivée pour les aliments et par rapport aux surfaces disponibles pour l'expansion des activités agricoles.

9

L'agro-industrie du bioéthanol de canne à sucre s'articule avec de nombreux secteurs de l'économie et promeut le développement de diverses activités, comme la prestation de services, l'industrie des équipements agricoles et industriels, et la logistique. L'appui donné au développement scientifique et technologique est un élément à la fois important de cette chaîne productive, mais aussi fondamental pour garantir une utilisation de la matière première avec un faible impact environnemental et une efficacité élevée.

10

Les possibilités d'expansion de la production de bioéthanol de canne à sucre sont amples, non seulement au Brésil, mais aussi dans d'autres pays tropicaux humides, du fait de la disponibilité de terres non utilisées ou utilisées pour des activités d'élevage à basse productivité et de l'existence d'un climat adéquat.

Une bonne partie des caractéristiques du bioéthanol de canne à sucre sont encore insuffisamment connues et il serait souhaitable que les preneurs de décision publics et privés et les formateurs d'opinion reçoivent des informations correctes et puissent prendre des positions argumentées au sujet de cette chaîne énergétique. Le bioéthanol de canne à sucre peut jouer un rôle important dans le modèle énergétique de nombreux pays, bien que, en fonction de l'innovation relative qu'il implique et de la diversité des chemins bioénergétiques, il soit compréhensible qu'il existe des questionnements, des préjugés et des désinformations à dépasser.

Un aspect essentiel, point de départ pour approfondir la compréhension des potentialités et des limitations des biocarburants, est de reconnaître l'importance du contexte productif. Beaucoup d'équivoques rencontrées dans des études concernant les perspectives pour le bioéthanol découlent d'une vision simpliste, réduite à l'existence d'une matière première et d'un produit, alors qu'en réalité, comme expliqué au Chapitre 3, la production de bioéthanol de canne a peu de rapport avec la production de ce même éthanol au moyen d'autres cultures, surtout en ce qui concerne les principaux indicateurs de durabilité.

Un exemple de cette compréhension limitée est l'usage du terme « biocarburants de seconde génération » pour désigner les biocarburants produits par des méthodes encore en développement, spécialement celles à base de résidus lignocellulosiques au moyen de processus tels que l'hydrolyse enzymatique ou la gazéification suivie de processus Fischer-Tropsch, comme abordé au Chapitre 5. Diverses études et documents suggèrent que ces biocarburants seront les garants de la viabilité de la bioénergie (qui pourra alors être considérée comme une source énergétique moderne et durable), dans la mesure où ils seront compétitifs sur le plan économique, et où ils présenteront un bon rapport entre l'énergie produite et l'énergie demandée dans sa production, où ils causeront un impact environnemental réduit avec un bon potentiel pour atténuer le changement climatique et sans affecter la production d'aliments,

en utilisant intégralement la matière première. Or, toutes ces exigences sont déjà respectées pleinement par le bioéthanol de canne à sucre, et il n'est pas nécessaire d'attendre des technologies encore à l'étude, et dont les coûts projetés (pour d'ici à 20 ans) sont du même ordre de grandeur que les coûts déjà pratiqués actuellement dans l'agro-industrie de la canne à sucre dans les pays tropicaux [IEA (2005)]. Il est intéressant de développer de nouvelles technologies pour le bioéthanol, mais elles ne sont absolument pas indispensables pour que soit stimulée dès à présent son utilisation de forme plus généralisée.

Heureusement, la compréhension de la portée du bioéthanol de canne à sucre tend à s'amplifier et plusieurs forums importants cherchent déjà à mettre en avant ce biocarburant, parmi les autres, en indiquant sa viabilité et son caractère rationnel. En particulier, les documents des agences internationales sont de plus en plus clairs lorsqu'elles reconnaissent que l'encouragement à la production du bioéthanol par des méthodes inefficaces et l'adoption de barrières à l'importation de l'éthanol de canne à sucre par les pays développés ont augmenté en vérité les distorsions dans les marchés de l'énergie et des biens agricoles.

Citons, entre autres, une étude de l'Organisation pour la Coopération et le Développement Économique (OCDE) sur l'impact des biocarburants dans les marchés agricoles, dans laquelle il est affirmé que :

Réduire de telles barrières (y compris la création de normes internationales pour les biocarburants) non seulement permettrait aux pays en développement de vendre mieux leurs produits, mais aiderait également les pays importateurs à atteindre les objectifs environnementaux implicites dans les politiques nationales de biocarburant, à condition que les biocarburants soient produits dans les pays exportateurs d'une forme rationnelle au niveau de l'environnement [OCDE (2007a)].

Il vaut la peine de mentionner également le rapport annuel du Fond Monétaire International, qui cherche à montrer comment les barrières imposées à l'importation de biocarburants efficaces sont néfastes pour tous les pays [IMF (2007)], et une information du Programme ESMAP, de la Banque Mondiale, qui recommande l'ouverture du commerce international des biocarburants comme moyen d'augmenter leur efficacité énergétique et environnementale [ESMAP (2007)].

Sur le même diapason et avec une clarté croissante, le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD), dans son Rapport de Développement Humain 2007/2008, se manifeste comme suit :

Le commerce international pourrait jouer un rôle bien plus important dans l'expansion des marchés de combustibles alternatifs. Le Brésil est plus efficace que l'Union Européenne ou que les États-Unis dans la production de l'éthanol. En outre, l'éthanol de canne à sucre est plus efficace dans la réduction des émissions de carbone. Le problème est que les importations d'éthanol brésilien sont restreintes par des tarifs d'importation élevés. Si ces tarifs étaient supprimés, il en résulterait des gains non seulement pour le Brésil mais aussi pour l'atténuation des altérations climatiques [UNDP (2007)].

La Banque Mondiale, dans un document sur les solutions pour la crise de l'offre d'aliments, signé par son président, émet une opinion semblable :

Il est nécessaire que l'Europe et les États-Unis réduisent leurs subventions et leurs barrières douanières qui favorisent les biocarburants dérivés du maïs et des graines oléagineuses. Aux États-Unis, l'utilisation du maïs pour la production de bioéthanol a consommé plus de 75% de l'augmentation de la production globale de cette céréale, au cours des trois dernières années. Les politiciens preneurs de décision doivent prendre en considération des « soupapes de sécurité » qui rendent ces politiques difficiles quand les prix sont élevés. Le choix ne doit pas être : aliment ou combustible. Des réductions dans les tarifs sur l'éthanol importé par les marchés nord-américain et européen encourageraient une production plus efficiente de biocarburants de canne, qui ne concurrence pas directement la production alimentaire, et augmenteraient les chances pour les pays plus pauvres, y compris en Afrique [World Bank (2008)].

La formation de marchés globaux pour le bioéthanol et l'élargissement de ses bénéfices dépendent beaucoup du fait que cette compréhension correcte de la réalité puisse se transformer en mesures effectives.

En rapport direct avec la formation des marchés vue ci-dessus, et également importants pour le développement de la production des biocarburants sur des bases durables, citons d'autres points de l'agenda comme l'intégration et la coordination des politiques nationales, la réalisation d'études d'évaluation des potentiels pour la production de biocarburants, avec une identification claire des problèmes, des impacts négatifs et des avantages de chaque cas. Cela permettra de renforcer la préparation des preneurs de décision et de promouvoir une articulation des politiques commerciales et de combat du changement climatique, selon la vision d'un groupe de personnes expérimentées dans l'étude des biocarburants [Best et al. (2008)].

Il est important d'observer que l'agro-industrie moderne de la canne à sucre présente encore de grandes possibilités de diversification de ses produits et d'augmentation des disponibilités énergétiques. Avec l'utilisation des technologies en développement ou déjà en phase-pilote, l'évolution se fait toujours d'avantage en direction des biorraffineries, complexes productifs capables de fournir de la bioénergie et des biomatériaux divers, y compris des aliments et des plastiques biodégradables. Dans la même direction, les études agronomiques actuelles, faites dans le but de préserver et de diversifier la base de germoplasme de la canne à sucre, tendent à gagner de l'ampleur. Elles incluent des études fondamentales sur le processus photosynthétique, encore à la frontière de la connaissance et avec d'intéressantes perspectives d'augmentation dans le rendement énergétique et productif de ce végétal, qui est déjà un des plus efficaces dans la conversion de l'énergie solaire. L'agro-industrie de la canne à sucre commence à peine à montrer ses possibilités.

Il reste certainement beaucoup à faire et beaucoup de défis à relever pour l'expansion des systèmes bioénergétiques, mais les bénéfices seront proportionnels, car un développement

énergétique sain et consistant est déterminant pour consolider un nouveau rapport entre la nature et la société. C'est sur la base de ce point de vue que la production et l'utilisation de bioéthanol de canne à sucre offrent la perspective concrète de commencer la construction d'une nouvelle réalité énergétique, plus durable, qui fasse de cette agro-industrie le levier de transformations souhaitables sur les plans social et économique. Le modèle brésilien, perfectionné durant des décennies et avec de nouvelles possibilités d'expansion, avec productivité et efficacité, est à la disposition des pays qui, en fonction de leur demande de combustibles, désiraient réduire de manière compétitive leurs émissions de gaz à effet de serre et diversifier leur source d'approvisionnement énergétique, ou qui, en raison de leur climat, leur sol et leur peuple, pourront assurer avec succès une production efficace de biocarburants pour l'utilisation et le bénéfice de tous.



Annexes

Annexe 1 – Production de canne et d'éthanol anhydre et hydraté au Brésil

| Année | Production de canne [million de t] ⁽¹⁾ | Production d'alcool éthylique [10 ³ m ³] ⁽²⁾ | Production d'alcool hydraté [10 ³ m ³] ⁽²⁾ | Production d'alcool anhydre [10 ³ m ³] ⁽²⁾ |
|-------|--|---|---|---|
| 1975 | 88.92 | 580 | 360 | 220 |
| 1976 | 102.77 | 642 | 370 | 272 |
| 1977 | 120.01 | 1,388 | 300 | 1,088 |
| 1978 | 129.06 | 2,248 | 399 | 1,849 |
| 1979 | 139.27 | 2,854 | 527 | 2,327 |
| 1980 | 146.23 | 3,676 | 1,501 | 2,175 |
| 1981 | 153.78 | 4,207 | 2,859 | 1,348 |
| 1982 | 186.38 | 5,618 | 2,091 | 3,527 |
| 1983 | 216.45 | 7,951 | 5,395 | 2,556 |
| 1984 | 241.39 | 9,201 | 7,059 | 2,142 |
| 1985 | 246.54 | 11,563 | 8,419 | 3,144 |
| 1986 | 238.49 | 9,983 | 7,863 | 2,120 |
| 1987 | 268.58 | 12,340 | 10,185 | 2,155 |
| 1988 | 258.45 | 11,523 | 9,837 | 1,686 |
| 1989 | 252.29 | 11,809 | 10,315 | 1,494 |
| 1990 | 262.60 | 11,518 | 10,669 | 849 |
| 1991 | 260.84 | 12,862 | 10,818 | 2,044 |
| 1992 | 271.43 | 11,766 | 9,540 | 2,226 |
| 1993 | 244.30 | 11,395 | 8,869 | 2,526 |
| 1994 | 292.07 | 12,513 | 9,715 | 2,798 |
| 1995 | 303.56 | 12,745 | 9,742 | 3,003 |
| 1996 | 325.93 | 14,134 | 9,701 | 4,433 |
| 1997 | 337.20 | 15,494 | 9,823 | 5,671 |
| 1998 | 338.97 | 14,121 | 8,438 | 5,683 |
| 1999 | 331.71 | 12,981 | 6,807 | 6,174 |
| 2000 | 325.33 | 10,700 | 5,056 | 5,644 |
| 2001 | 344.28 | 11,466 | 4,985 | 6,481 |
| 2002 | 363.72 | 12,588 | 5,548 | 7,040 |
| 2003 | 389.85 | 14,470 | 5,638 | 8,832 |
| 2004 | 416.26 | 14,648 | 6,789 | 7,859 |
| 2005 | 419.56 | 16,040 | 7,832 | 8,208 |
| 2006 | 457.98 | 17,764 | 9,851 | 7,913 |

Source : ⁽¹⁾ IBGE ; ⁽²⁾ BEN 2007.

Annexe 2A – Superficie plantée de canne au Brésil

| Année | Brésil | | |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------|
| | Production (mil t) | Surface récoltée (mil ha) | Rendement moyen (t/ha) |
| 1990 | 262.674 | 4.273 | 61,5 |
| 1991 | 260.888 | 4.211 | 62,0 |
| 1992 | 271.475 | 4.203 | 64,6 |
| 1993 | 244.531 | 3.864 | 63,3 |
| 1994 | 292.102 | 4.345 | 67,2 |
| 1995 | 303.699 | 4.559 | 66,6 |
| 1996 | 317.106 | 4.750 | 66,8 |
| 1997 | 331.613 | 4.814 | 68,9 |
| 1998 | 345.255 | 4.986 | 69,2 |
| 1999 | 333.848 | 4.899 | 68,1 |
| 2000 | 326.121 | 4.805 | 67,9 |
| 2001 | 344.293 | 4.958 | 69,4 |
| 2002 | 364.389 | 5.100 | 71,4 |
| 2003 | 396.012 | 5.371 | 73,7 |
| 2004 | 415.206 | 5.632 | 73,7 |
| 2005 ¹ | 455.272 | 6.172 | 73,8 |

Annexe 2B – Superficie plantée de canne dans les principaux états producteurs

| Année | Principaux états producteurs | | | | | | | | | |
|-------------------|------------------------------|------------------|------------|------------------|------------|------------------|--------------|------------------|------------|------------------|
| | São Paulo | | Paraná | | Alagoas | | Minas Gerais | | Pernambuco | |
| | Production | Surface récoltée | Production | Surface récoltée | Production | Surface récoltée | Production | Surface récoltée | Production | Surface récoltée |
| 1990 | 137.835 | 1.812 | 11.736 | 159 | 26.151 | 559 | 17.533 | 298 | 22.818 | 467 |
| 1991 | 136.200 | 1.852 | 12.219 | 172 | 22.214 | 484 | 17.583 | 276 | 23.505 | 467 |
| 1992 | 145.500 | 1.890 | 13.571 | 186 | 22.669 | 448 | 17.354 | 272 | 25.199 | 488 |
| 1993 | 148.647 | 1.896 | 13.694 | 190 | 12.922 | 323 | 15.743 | 261 | 14.347 | 363 |
| 1994 | 174.100 | 2.173 | 15.946 | 216 | 21.740 | 439 | 16.212 | 262 | 19.259 | 400 |
| 1995 | 174.960 | 2.259 | 20.430 | 256 | 21.573 | 450 | 16.726 | 268 | 20.665 | 418 |
| 1996 | 192.320 | 2.493 | 23.468 | 285 | 20.754 | 432 | 13.331 | 247 | 18.784 | 401 |
| 1997 | 194.025 | 2.446 | 24.564 | 300 | 24.850 | 450 | 16.262 | 279 | 20.765 | 421 |
| 1998 | 199.783 | 2.565 | 26.642 | 310 | 28.524 | 461 | 16.918 | 279 | 19.622 | 402 |
| 1999 | 197.144 | 2.555 | 27.106 | 338 | 26.860 | 451 | 17.557 | 280 | 12.253 | 323 |
| 2000 | 189.040 | 2.485 | 23.192 | 327 | 27.798 | 448 | 18.706 | 291 | 15.167 | 304 |
| 2001 | 198.932 | 2.567 | 27.424 | 338 | 28.693 | 456 | 18.975 | 294 | 15.977 | 339 |
| 2002 | 212.707 | 2.661 | 28.083 | 359 | 25.171 | 438 | 18.231 | 278 | 17.626 | 348 |
| 2003 | 227.981 | 2.818 | 31.926 | 374 | 27.221 | 416 | 20.787 | 303 | 18.522 | 359 |
| 2004 | 239.528 | 2.952 | 32.643 | 400 | 26.284 | 423 | 24.332 | 335 | 19.015 | 364 |
| 2005 ¹ | 266.071 | 3.285 | 34.882 | 437 | 23.991 | 397 | 31.587 | 424 | 18.832 | 370 |

Source : Production, superficie et rendement moyen : IBGE – Production Agricole Communale (PAM – 1990 à 2004) et Relevé Systématique de la Production Agricole (LSPA - juillet/2006). Elaboration : Secrétariat de Politique Agricole – MAPA (Ministère de l’Agriculture, de l’Élevage et de l’Approvisionnement). Annuaire 2005.

Note : ¹ Estimation.

Annexe 3 – Prix de l'éthanol payé au producteur à São Paulo

| Année (semestre) | Alcool anhydre (R\$/litre) | Alcool hydraté (R\$/litre) |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2000 (2) | 0,668678 | 0,749999 |
| 2001 (1) | 0,629092 | 0,716373 |
| 2001 (2) | 0,623336 | 0,706785 |
| 2002 (1) | 0,584636 | 0,503122 |
| 2002 (2) | 0,6228 | 0,543285 |
| 2003 (1) | 0,913213 | 0,783303 |
| 2003 (2) | 0,653644 | 0,559895 |
| 2004 (1) | 0,521573 | 0,454482 |
| 2004 (2) | 0,832212 | 0,713184 |
| 2005 (1) | 0,803179 | 0,70349 |
| 2005 (2) | 0,883684 | 0,774705 |
| 2006 (1) | 1,070215 | 0,998262 |
| 2006 (2) | 0,908019 | 0,795583 |
| 2007 (1) | 0,850049 | 0,763721 |
| 2007 (2) | 0,719413 | 0,634066 |

Source : Centre d'Études Avancées en Économie Appliquée (Cepea). <<http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool/>>.

Note : En juin 2003, les Indicateurs d'Alcool Cepea/Esalq commencèrent à utiliser le CDI (Certificat de Dépôt Interbancaire) pour le décompte des négociations à terme, et non plus la NPR. A partir de la semaine du 6 au 10 Mai 2002, les indicateurs hebdomadaires de l'alcool anhydre et de l'alcool hydraté combustibles Cepea/Esalq commencèrent à être calculés sans aucun impôt (ICMS, PIS/Cofins ou Cide).





Références

- ABIOVE. *Estatísticas do Complexo da Soja*. Associação Brasileira das Indústrias de Óleo Vegetal. Disponible sur : www.abiove.com.br. Accès en : mars 2008.
- ABRANTES, R. et al. « Caracterização das emissões de aldeídos de veículos do ciclo diesel ». *Revista de Saúde Pública*, São Paulo, v. 39 (3), 2002.
- ADEN, A. et al. *Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis for corn stover*. Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2002 (Technical Report NREL TP-510-32438).
- AEROÁLCOOL. *Vantagens do uso do álcool em motores aeronáuticos*. Disponible sur : <http://www.aeroalcool.com.br/vantagens.htm>. Accès en : avril 2008
- AGÊNCIA FAPESP. *Notícias sobre etanol*. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp). Disponible sur : <http://www.agencia.fapesp.br/>. Accès en : avril 2008
- AKIYAMA, M. et al. « Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation ». *Polymer Degradation and Stability*, v. 80, 2003.
- ALEXANDER, M, *Ethanol Africa : clean maize fuel*. Sustainable Development, 2005. Disponible sur : <http://www.southafrica.info/about/sustainable/ethanol-120905.htm>. Accès en : juin 2008.
- ALMEIDA, E. F. et al. *The performance of Brazilian biofuels : an economic, environmental and social analysis*. Rio de Janeiro : Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- ALVES, F. « Por que morrem os cortadores de cana? ». *Saúde e Sociedade*, São Paulo, v. 15 (3), 2006.
- AMYRIS. « Amyris and Crystalsev join to launch innovative renewable diesel from sugarcane by 2010 ». *Amyris Press Release*, avril 2008.
- ANDERSSON, P. & VICTORIN, K. *Inhalation of ethanol : literature survey and risk assessment*. Estocolmo : Institutet for Miljomedicin (Institute of Environmental Medicine), Karolinska Institute, 1996 (IMM Rapport 3/96).
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Banco de Informações de Geração*. Disponible sur : <http://www.aneel.gov.br>. Accès en : mars 2008.
- ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuário Estatístico da Indústria Automobilística Brasileira*. São Paulo : Anfavea, 2008.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. *Preços dos combustíveis*. Disponible sur : <http://www.anp.gov.br/index.asp>. Accès en : décembre 2007.

_____. *Qualidade dos combustíveis*. Disponible sur : <http://www.anp.gov.br/index.asp>. Accès en : février 2008.

ANTONIL, A. J. *Cultura e opulência do Brasil*. Belo Horizonte : Itatiaia, 1982.

APACE RESEARCH. *Intensive field trial of ethanol/petrol blends in vehicles*. Apace Research Ltd, EDRC Project 211, Australia, 1998.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Alcohols and ethers, a technical assessment of their application as fuel and fuel components*. Washington : American Petroleum Institute, 1998 (API Publication 4.261).

_____. *Shipping ethanol through pipelines*. American Petroleum Institute. Disponible sur : <http://www.api.org/aboutoilgas/sectors/pipeline/>. Accès en : novembre 2007.

APLA – ASOCIACIÓN PETROQUÍMICA Y QUÍMICA LATINOAMERICANA. *Álcool é solução para indústria química*. Asociación Petroquímica y Química Latinoamericana. Disponible sur : <http://www.apla.com.ar/petroquimica2/mostrar.php?&id=3679>. Accès en : juin 2006.

ARRIGONI, E. D. B. & ALMEIDA, L. C. « Defensivos (pesticidas e outros) ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005.

ASSOCANA – ASSOCIAÇÃO RURAL DOS FORNECEDORES E PLANTADORES DE CANA DA MÉDIA SOROCABANA. *Custo médio operacional da lavoura da cana-de-açúcar*. Assis : Assocana, 2008.

AUTOALLIANCE. *Worldwide Fuel Chart*. 4^e éd. Ecea, Alliance, EMA, Jama, septembre 2006.

BABU, S. P. *Observations on the current status of biomass gasification*. International Energy Agency (IEA) Task 33 : Thermal gasification of Biomass, 2005.

BABU, S. P. & HOFBAUER, H. « Status and prospects of biomass gasification ». *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion Conference (STCBC)*, août 2004.

BALAJI, R. *Oil cos in a bind gasohol supply*. Calcutá : Business Line (The Hindu Group), 2002.

BALSADI, O. V. « Mercado de trabalho assalariado na cultura da cana-de-açúcar no Brasil no período 1992-2004 ». *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 37, n. 2, février 2007.

BAUMOL, W. J. « Contestable markets : an uprising in the theory of industry structure ». *American Economic Review*, v. 72, 1982.

- BENTO, M. « Controle biológico e feromônios no manejo de pragas ». *Fórum Permanente de Agronegócios*, Campinas, CGU/Cori, Unicamp, septembre 2006.
- BERNDES, G. et al. « The contribution of biomass in the future global energy supply : a review of 17 studies ». *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (1), 2003.
- BERTELLI, L. G. « A verdadeira história do Proálcool – Programa Nacional do Álcool ». *O Estado de S. Paulo*, 30.10.2007.
- BERTONCINI, E. I. « Geração de resíduos da indústria da cana-de-açúcar ». *Workshop : Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar*. Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BEST. *Bioethanol for Sustainable Transport*. Disponible sur : <http://www.best-europe.org/>. Accès en : mars 2008.
- BEST, G. et al. *A sustainable biofuels consensus*. Bellagio : Rockefeller Foundation, Bellagio Center, avril 2008.
- BFS/FAO. « Second FAO Technical Consultation on Bioenergy and Food Security ». *Summary Proceedings*, Rome, février 2008.
- BIAS – BAYLOR INSTITUTE FOR AIR SCIENCE. *Development of renewable aviation fuels*. Baylor Institute for Air Science, Baylor University. Disponible sur : <http://www.baylor.edu/bias>. Accès en : septembre 2006.
- BIOCYCLE. Disponible em : <http://www.biocycle.com.br>. Accès en : mars 2008.
- BLANCO-CANQUI, H. & LAL, R. « Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production ». *Geoderma*, v. 141, 2007.
- BNDES. *BNDES aprova financiamento de R\$ 1,5 milhão para apoio a pesquisa de inovação em etanol*. Disponible sur : http://www.bndes.gov.br/noticias/2007/not194_07.asp. Accès en : décembre 2007.
- BRANCO, G. M. « Motores diesel : ecológicos ou poluidores? ». *ECOinforme*, septembre 2004.
- BRASIL. *Decreto 19.717, Obrigatoriedade da adição de álcool à gasolina de procedência estrangeira*. Rio de Janeiro, 20.2.1931.
- BRUSSTAR, M. & BAKENHUS, M. *Economical, high efficiency engines technologies for alcohol fuels*. US Environmental Protection Agency, 2005.

- BURNQUIST, W. L. & LANDELL, M. « O melhoramento genético convencional e a disponibilidade de variedades ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005.
- CANAVIALIS. *Melhoramento genético*. Disponible sur : <http://www.canavialis.com.br/>. Accès en : mars 2008.
- CARBOGÁS. *Produção de CO₂ de grau alimentar*. Disponible sur : <http://www.carbogas.ind.br>. Accès en : mars 2008.
- CARVALHO, E. *Perspectivas da agroenergia*. São Paulo : Unica, 2007.
- CARVALHO, P. A. « Informações pessoais ». Rio de Janeiro : Superintendência de Qualidade de Produtos, Agência Nacional do Petróleo, 2003.
- CASTRO, M. H. M & SCHWARTZMAN, S. *Tecnologia para a indústria : a história do Instituto Nacional de Tecnologia [1981]*. Disponible sur : <http://www.schwartzman.org.br/simon/>. Accès en : avril 2008.
- CAVALCANTI, E. *Importância da qualidade do álcool etílico combustível*. Présenté au « I Seminário sobre Tecnologia para Pequena Produção de Álcool », Confederação Nacional da Agricultura, Brasília, 2007.
- CAVALCANTI, F. C. B. *Transformando competências em casos de sucesso : a Oxiteno e o desenvolvimento de tecnologia nacional em catalisadores*. Annales du « XII Congresso Brasileiro de Catálise », Sociedade Brasileira de Catálise, 2005.
- CBD – CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY. *Recommendations*. Convention on Biological Diversity. Disponible sur : <http://www.cbd.int/recommendations/?rec=XII/7>. Accès en : avril 2008.
- CDM – CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponible sur : <http://cdm.unfccc.int/index.html>. Accès en : avril 2008.
- CEPAL – COMISSÃO ECONÔMICA PARA AMÉRICA LATINA E O CARIBE. *Fuentes Renovables de energia en América Latina y el Caribe : dos años después de la Conferencia de Bonn*. Santiago de Chile : Proyecto Cepal/GTZ, Comissão Econômica para América Latina e o Caribe, 2007.
- CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *Preços de etanol anidro e hidratado*. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponible sur : <http://cepea.usp.br>. Accès en : avril 2008.

CERRI, D. G. P. *Agricultura de precisão em cana-de-açúcar : instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo*. Campinas : Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2005 (Thèse de Doctorat).

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Redução da queima da palha da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo*. São Paulo : Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, mars 2008.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 1*. Campinas : Nipe/Unicamp et Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2005.

_____. *Estudo prospectivo de solo, clima e impacto ambiental para o cultivo da cana-de-açúcar e análise técnica/econômica para o uso do etanol como combustível – Etanol Fase 3*. Campinas : Nipe/Unicamp et Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2007a.

_____. *Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 2*. Campinas : Nipe/Unicamp et Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2007b.

_____. *Informações aos autores*. Campinas : Centro de Gestão de Estudos Estratégicos, 2008.

CHEVRONTXACO CORP. *Motor Gasolines/ Oxygenated Gasoline*. Disponible sur : <http://www.chevron.com/prodserv/fuels/bulletin/motorgas/ch4.shtml>. Accès en : juillet 2006.

CMAI – CHEMICAL MARKET ASSOCIATED INC. *Petrochemical demand growth tracks economic growth*. Chemical Market Associated Inc., 2005.

CNPAB. *Fixação biológica de nitrogênio em plantas não leguminosas*. Embrapa Agrobiologia. Disponible sur : <http://www.cnpab.embrapa.br/pesquisas/fbnnl.html>. Accès en : avril 2008.

COELHO, S. T. et al. *A expansão da cultura canavieira no Estado de São Paulo*. Présenté au « VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético », Salvador, mai 2008.

CONCAWE. *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. Concawe, Eucar, European Commission, Versão 2007c, mars 2007. Disponible sur : <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>. Accès en : mai 2008.

CONSONNI, S. & LARSON, E. D. « Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles : Part A – Technologies and performance modeling ». *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 118, 1996a.

- _____. « Biomass-gasifier/aeroderivative gas turbine combined cycles : Part B – Performance calculations and economic assessment ». *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 118, 1996b.
- CORTEZ, L. A. B. *A expansão da produção de álcool como programa de desenvolvimento nacional*. Présenté dans le cadre du « Projeto Etanol », Brasília, CGEE/Nipe, 2007.
- CRESEB/UFPE/CHESF. *Atlas solarimétrico do Brasil*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (Cresesb), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) et Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf). Recife : UFPE, 2000.
- CTC – CENTRO DE TECNOLOGIA COPERSUCAR. *Diagrama de fases água/gasolina/etanol*. Piracicaba : Centro de Tecnologia Copersucar (atualmente Centro de Tecnologia Canavieira), 1998.
- _____. *Síntese do controle mútuo agroindustrial*. Piracicaba : Centro de Tecnologia Canavieira, 2005.
- _____. *Projetos e Pesquisas*. Centro de Tecnologia Canavieira. Disponible sur : <http://www.ctc.com.br/>. Accès en : avril 2008.
- CUNHA, F. *A logística atual de transporte das distribuidoras e a infra-estrutura para a exportação de álcool*. Petrobras Distribuidora, août 2003 (présentation Power Point).
- DAI, D. et al. « Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China ». *Energy Conversion and Management*, v. 47, 2006.
- DEDINI. *DHR Dedini Hidrólise Rápida*. Dedini Indústrias de Base. Disponible sur : <http://www.dedini.com.br/pt/pdf/dhr.pdf>. Accès en : mars 2008.
- DEMEYER, A. et al. *La conversion bioenergetique du rayonnement solaire et les biotechnologies*. Paris : Technique et Documentation, 1985.
- DIAS LEITE, A. *A Energia do Brasil*. Rio de Janeiro : Elsevier, 2007.
- DIPARDO, J. *Outlook for biomass ethanol production and demand*. Washington : Energy Information Administration, Department of Energy, 2000.
- DOE – DEPARTMENT OF ENERGY. *Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol : a joint research agenda*, Report DOE/SC-0095, Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Department of Energy. Disponible sur : <http://www.doegenomes-tolife.org/biofuels/>. Accès en : juin 2006.
- DOE/USDA. *Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry : the technical feasibility of a billion-ton annual supply*. Washington : Department of Energy, US Department of Agriculture, 2005.

- DONZELLI, J. L. « Uso de fertilizantes na produção de cana-de-açúcar no Brasil » . Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005a.
- _____. « Erosão na cultura da cana-de-açúcar : situação e perspectivas » . Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005b.
- DRÖSCHER, M. *Kunststoffe : Werkstoffmärkte und Prognosen*. Kongress Zukunft der Werkstoff, Oberhausen, Fraunhofer Institut, septembre 2006.
- DUPONT. *BioButanol*. Disponible sur : http://www2.dupont.com/Biofuels/en_US/index.html. Accès en : mai 2008.
- EBAMM. *ERG Biofuels Analysis Meta-Model*. Release 1.0, Energy and Resources Group, University of California, Berkeley, 2005.
- ECOINVEST. Informações aos autores. Empresa de investimentos e desenvolvimento de projetos MDL, avril 2008.
- EIA – ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Petroleum Statistics*. Energy Information Administration, Department of Energy. Disponible sur : http://www.eia.doe.gov/oil_gas/petroleum/info_glance/petroleum.html. Accès en : mars 2008.
- EL SAYED, M. A. et al. *Production of ethanol from sugar beet (Appendix Q)*. Carbon and Energy Balance for a Range of Biofuels Options, DTI Project B/B6/00784, Londres, 2005.
- ELIA NETO, A. « Captação e uso de água no processamento da cana-de-açúcar ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005.
- _____. *Meio ambiente e setor sucroalcooleiro*. « Canasul 2007, I Congresso da Cadeia Produtiva da Cana-de-Açúcar em Mato Grosso do Sul », Campo Grande, 2007.
- EPFL – ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. *The roundtable on sustainable biofuels : ensuring biofuels deliver on their promise of sustainability*. Energy Center, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2008. Disponible sur : <http://cgse.epfl.ch/page65660.html>. Accès en : avril 2008.
- ERS – ECONOMIC RESEARCH SERVICE. *Global agricultural supply and demand : factors contributing to the recent increase in food commodity prices*. Washington : Economic Research Service, Department of Agriculture, 2008 (Report WRS-0801).

ESMAP – ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAMME. *Potential for biofuels for transport in developing countries*. Washington : Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Program/World Bank, 2005.

_____. *Considering trade policies for liquid biofuels*. Washington : Energy Sector Management Assistance Programme, United Nations Development Program/World Bank, 2007.

ETHANOLBUS. *Ethanol buses in Sweden*. Disponible sur : <http://www.ethanolbus.com/>. Accès en : mars 2008.

EUROPEAN COMMISSION. *Council Regulation (EC) n° 980/2005*. Bruxelles : European Commission, juin 2005.

EXAME. « A nova fronteira do etanol ». *Portal Exame*, 20.9.2007. Disponible sur : <http://portalexame.abril.com.br/revista/exame/edicoes/0902/economia/m0138746.html>. Accès en : juin 2008.

F. O. Licht. *World Ethanol Markets : Outlook to 2015*. Kent : F. O. Licht, 2006.

_____. *World Sugar Yearbook 2007*. Kent : F. O. Licht, 2007.

_____. « Cogeneration may be the next big story for the Brazilian sugar industry ». *World Ethanol & Biofuels Report*, v. 6 (13), mars 2008 (2008a).

_____. « Ghana : Sekab to source ethanol from Northern Sugar in 2010-20 ». *World Ethanol & Biofuels Report*, v. 6 (17), mai 2008 (2008b).

FAAIJ, A. P. C. et al. *Long term perspectives of Biomass Integrated Gasification/Combined Cycle Technology : costs and electrical efficiency*. Utrecht : Novem/Department. of Science, Technology and Society, Utrecht University, 1998.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Climdata Rainfall Database*. Rome : United Nations Food and Agriculture Organization, Sustainable Development Department, Agrometeorology Group, 1997a.

_____. *Wood Energy Information System (WEIS)*. Preliminary report. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, Forestry Department, 2001.

_____. « World agriculture : towards 2015/2030 ». Dans : BRUINSMA, J. (édit.). *An FAO perspective*. Londres : Food and Agriculture Organization of the United Nations, Earthscan Publications, 2003.

_____. *Global Forest Resources Assessment 2005*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

- _____. *Sugar : global market analysis*. Food Outlook. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007a.
- _____. *What is food security*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007b.
- FAOSTAT. *Sugar cane production*. Disponible sur : <http://faostat.fao.org>. Accès en : mars 2008 (2008a).
- _____. *Food commodities prices*. Disponible sur : <http://faostat.fao.org>. Accès en : avril 2008 (2008b).
- _____. *Bioenergy and Food Security Project (BEFS)*. Disponible sur : <http://www.fao.org/nr/ben/befs/>. Accès en : mai 2008 (2008c).
- FAPESP. *Brazil world leader in sugarcane and ethanol knowledge and technology (Fapesp's contribution)*. São Paulo : The State of São Paulo Research Foundation, 2007.
- FARGIONE, J. et al. « Land clearing and the biofuel carbon debt ». *Science*, v. 319 (5.867), 2008.
- FARRELL, A. E. et al. « Ethanol can contribute to energy and environmental goals ». *Science*, v. 311 (27), 2006.
- FAURÉ, J. M. *Competition for natural resources : the case of water*. « II FAO Consultation on Bioenergy and Food Security », FAO, Rome, 2008.
- FBDS – FUNDAÇÃO BRASILEIRA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. *Liquid biofuels for transportation in Brazil*. Projeto GTZ/FBDS. Rio de Janeiro : Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável, 2005.
- FERNANDES, A. C. *Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar*. 2^e éd. Piracicaba : Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 2003.
- FRIE, C. et al. *White paper : sustainable biofuels program : the need for biofuel certification/labelling*. Lausanne : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.
- FUEL TESTERS. *Ethanol fuel history*. Disponible sur : http://www.fuel-testers.com/ethanol_fuel_history.html. Accès en : mai 2003.
- FUREY, R. L. *Volatility characteristics of gasoline-alcohol and gasoline-ether fuel blends*. Society of Automotive Engineers, 1985 (SAE Paper 852116).
- FURTADO, A. T. et al. *O sistema de inovação da agroindústria canavieira brasileira*. Présenté au « VI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético », Salvador, mai 2008.

- GALBE, M. & ZACCHI, G. « A review of the production of ethanol from softwood ». *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 59, 2002.
- GAZETA MERCANTIL. « Etanol vai ter padrão mundial em 2008 », *Gazeta Mercantil*, São Paulo, 7.2.2008.
- GNANSOUNOU, E. et al. *The Context of the Southern Africa Development Community (SADC). Sustainable Liquid Biofuels for Transport*, Energy Center, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, nov. 2007. Disponible sur : http://lasen.epfl.ch/webdav/site/lasen/shared/Sustainable_Liquid_Biofuels_for_Transport-SADC.pdf. Accès en : juin 2008.
- GAVA, G. J. C. et al. « Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system ». *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 40 (7), 2005.
- GBEP. *A review of the current state of bioenergy development in G8 + 5 countries*. Disponible sur : http://www.globalbioenergy.org/fileadmin/user_upload/gbep/docs/2007. Accès en : avril 2008.
- GENENCOR INTERNATIONAL INC. « Genencor celebrates major progress in the conversion of biomass to ethanol ». *Focus on Catalysts*, décembre 2004.
- GLOBAL BIOFUELS CENTER. Informações aos autores por KLEIN, T. [directrice executive], 2008. Disponible sur : <http://www.ifqcbiofuels.org/>.
- GOLDEMBERG, J. *Brazilian Energy Initiative*. Présenté au « World Summit on Sustainable Development », Johannesburg, septembre 2002.
- GOLDEMBERG, J. & MACEDO, I. C. « The Brazilian Alcohol Program – An overview ». *Energy for Sustainable Development*, v. 1 (1), 1994.
- GOLDEMBERG, J. et al. « The sustainability of ethanol production from sugarcane ». *Energy Policy*, v. 36 (4), 2008.
- GOLDEMBERG, J. et al. « Ethanol learning curve : the Brazilian experience ». *Biomass and Bioenergy*, v. 26 (3), 2004.
- GOLDEMBERG, J. et al. « The Brazilian Fuel-Alcohol Program ». Dans : JOHANSSON, T. B. et al. (édits.). *Renewable energy : sources for fuels and electricity*. Washington : Island Press, 1993.
- GOMES, M. G. F. M. « Experiência da Petrobras no transporte de etanol carburante ». *Revista Opiniões*, numéro spécial sur la logistique dans le secteur du sucre et de l'alcool, avril-juin 2008.
- GOODLAND, R. et al. (eds.). *Population, technology, and lifestyle : the transition to sustainability*. New York : Island Press, 1992.

- GPC – GLOBAL PETROLEUM CLUB. *Oil from algae*. Global Petroleum Club. Disponible sur : <http://www.globalpetroleumclub.com>. Accès en : février 2008.
- GRABOWSKI, P. *Biomass thermochemical conversion : OBP efforts*. Washington : Office of Biomass Program, 2004.
- GRAF, A. & KOEHLER, T. *Oregon cellulose-ethanol study : An evaluation of the potential for ethanol production in Oregon using cellulose-based feedstocks*. Salem : Oregon Office of Energy, juin 2000.
- GRAY, K. A. et al. « Bioethanol ». *Current Opinion in Chemical Biology*, v. 10, 2006.
- GUILHOTO, J. J. M. « Geração de emprego nos setores produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool no Brasil e suas macro-regiões ». Relatório *Cenários para o setor de Açúcar e Álcool*. São Paulo : MB Associados e Fipe, 2001.
- GUIMARÃES, M. et al. *Energia da biomassa – Alavanca de uma nova política industrial*. Brasília : Secretaria de Tecnologia Industrial, Ministério da Indústria e Comércio, 1986.
- HALL, D. O. et al. « Visão geral de energia e biomassa ». Dans : ROSILLO-CALLE, F. et al. (orgs.). *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*. Campinas : Unicamp, 2005.
- HALL, D. O. & RAO, K. *Photosynthesis*. 6^e éd. Cambridge : Cambridge University Press, 1999.
- HAMELINCK, C. N. *Outlook for advanced biofuels*. Utrecht : Universiteit Utrecht, 2004 (PhD Thesis).
- HAMELINCK, C. N. et al. *Production of FT transportation fuels from biomass : process analysis and optimisation, and development potential*. Utrecht : Copernicus Institute, Utrecht University, 2003 (Report NWS-E-2003-08).
- HAMELINCK, C. N. et al. *Future prospects for the production of methanol and hydrogen from biomass*. Utrecht : Science, Technology and Society/Utrecht University, 2001.
- HAMELINCK, C. N. et al. « Ethanol from lignocellulosic biomass : techno-economic performance in short, middle and long-term ». *Biomass and Bioenergy*, v. 28 (4), 2005.
- HASEGAWA, M. & FURTADO, A. T. « Avaliação dos impactos de programas de P&D ». (Um estudo do ProCana). *Inovação Uniemp*, Campinas, v. 2 (3), 2006.
- HASSUANI, S. J. et al. *Biomass power generation : sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba : PNUD-CTC, Série Caminhos para Sustentabilidade, 2005.

HECK, J. *Cogeração de eletricidade a partir do bagaço de cana*. Cia. Açucareira Vale do Rosário, 2006.

HOOGWIJK, M. et al. « Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy ». *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (2), 2003.

HORTA NOGUEIRA, L. A. *Perspectivas de un Programa de biocombustibles en América Central*. Cidade do México : Proyecto Cepal/GTZ Uso Sustentable de Hidrocarburos, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2004.

_____. *Costos y precios para etanol en Centro América*. Cidade do México : Proyecto Cepal/ Gobierno de Italia, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2006a.

_____. *Ethanol as fuel in Brazil (small distilleries and use of ethanol as cooking fuel)*. Belo Horizonte : Projeto Gaia, Winrock Foundation et Banco do Povo, 2006b.

_____. *Biocombustíveis na América Latina : situação atual e perspectivas*. São Paulo : CADERNOS do Memorial da América Latina, 2007.

_____. *Sustainable woodfuel production in Brazil*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.

HOWELER, R. *Cassava in Asia : present situation and its future potential in agro-industry*. Bangkok : CIAT Cassava Office for Asia, Department of Agriculture, 2003.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Proconve – Programa de Controle das Emissões Veiculares*. Brasília : Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006. Disponible sur : <http://www.ibama.gov.br/proconve>. Accès en : novembre 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílios 2004, microdados Brasil*. Rio de Janeiro : Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2005 (CD-ROM, 2005).

_____. *Censo Agropecuário 2006 (Dados preliminares)*. Disponible sur : <http://www1.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/>. Accès en : avril 2008.

ICRISAT – INTERNATIONAL CROPS RESEARCH INSTITUTE FOR THE SEMI-ARID TROPICS. *Icrisat develops sweet sorghum for ethanol production*. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 2004. Disponible sur : <http://www.icrisat.org/media/2004/media13.htm>. Accès en : mai 2006.

IDEA – INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO AGROINDUSTRIAL. *Digital Usinas – Cadastro Nacional de Unidades Sucroalcooleiras*. Ribeirão Preto : Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial, 2007.

_____. « X Seminário de Mecanização e Produção de Cana-de-Açúcar ». Instituto de Desenvolvimento Agroindustrial, Ribeirão Preto, 2008.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Biofuels for transport : an international perspective*. Paris : International Energy Agency, 2004.

_____. *World Energy Outlook*. Paris : International Energy Agency, 2007.

_____. *Sustainable international bioenergy trade*. International Energy Agency. Disponible sur : www.fairtrade.org. Accès en : mars 2008.

IEA BIOENERGY. *Potential contribution of bioenergy to the world's future energy demand*. Paris : International Energy Agency, 2007 (IEA Bioenergy Task 40).

IEL/SEBRAE. *O novo ciclo da cana : estudo sobre a competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e prospecção de novos empreendimentos*. Brasília : Instituto Euvaldo Lodi/Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas, 2005.

IFPRI – INTERNATIONAL FOOD POLICY RESEARCH INSTITUTE. *A 2020 vision for food, agriculture, and the environment*, International Food Policy Research Institute. Washington : International Food Policy Research Institute, 2006.

IIED. *The multilateral trade and investment context for biofuels : Issues and challenges*. Sophia Murphy Institute for Agriculture and Trade Policy, dez. 2007. Disponible sur : <http://www.iatp.org/>. Accès en : mai 2008.

ILLOVO. *International Sugar Statistics*. Illovo Sugar, 2008. Disponible sur : <http://www.illovosugar.com/worldofsugar>. Accès en : mars 2008.

IMF – INTERNATIONAL MONETARY FUND. « Making the most of biofuels ». *World Economic Outlook*. Washington : International Monetary Fund, 2007.

INDIA INFOLINE. *Sugar*. Disponible sur : <http://www.indiainfo.com/sect/suin/ch07.html>. Accès en : mars 2008.

INOVAÇÃO UNICAMP. « Oxiteno apresenta projeto ao BNDES para construir biorrefinaria ; quer obter etanol a baixo custo para fabricar produtos químicos » [2006]. Disponible sur : http://www.inovacao.unicamp.br/report/news_oxiteno060807.shtml. Accès en : mars 2008.

- _____. « Diretor-executivo da Ridesa conta a história e o que faz a maior rede de pesquisa universitária em melhoramento genético da cana-de-açúcar » [2007]. Disponible sur : <http://www.inovacao.unicamp.br/etanol/report/entre-marcosridesa070522.php>. Accès en : décembre 2007.
- _____. « Empresas asiáticas investem US\$ 170 mi na produção de lisina : componente de ração animal multiplica por sete valor do açúcar » [2008]. Disponible sur : <http://www.inovacao.unicamp.br/report/news-lisina.shtml>. Accès en : mars 2008.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Projeto PRODES – Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite*. Estimativas anuais desde 1988 até 2007, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008. Disponible sur : <http://www.obt.inpe.br/prodes/>. Accès en : avril 2008.
- INSTITUTO FLORESTAL. *Situação atual dos remanescentes da cobertura vegetal natural do Estado de São Paulo*. São Paulo : Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004.
- IOWA CORN. « How our corn crop was used in 2005-06 ». Disponible sur : <http://www.iowa-corn.org>. Accès en : mars 2008.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2007 – Synthesis Report*. Genebra : Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO, Unep, 2008.
- ISA – INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. *Desmatamento na Amazônia e agronegócio*. Instituto Socioambiental, 2008. Disponible sur : <http://www.socioambiental.org/nsa/detalhe?id=2357>. Accès en : mai 2008.
- JANICK, J. *Sugarcane*. Tropical Horticulture, Purdue University. Disponible sur : http://www.hort.purdue.edu/newcrop/tropical/lecture_21/sugarcane_R.html. Accès en : décembre 2007.
- JANK, M. *Outlook for Brazilian ethanol technologies*. São Paulo : Unica, 2007.
- JANSSENS, M. J. J. et al. *The role of photosynthesis and bio-productivity on bioenergy yields*. Bonn : University of Bonn, Institute of Crop Science and Resource Conservation, 2007.
- JIN, H. et al. *Performance and cost analysis of future, commercially-mature gasification-based electric power generation from switchgrass*. Draft Manuscript to Biomass and Bioenergy, novembre 2006.
- JORNAL DO COMMERCIO. « Coperbo : uma idéia feliz e adequada ao seu tempo ». Disponible sur : http://www2.uol.com.br/JC/_1999/80anos/80d_29.htm. Accès en : décembre 1999.
- JORNALCANA. « Alltech reúne 400 produtores do Brasil e do mundo e anuncia início de atividades de fábrica de U\$ 25 milhões no Paraná ». *JornalCana*, 8.9.2005.

- JOSEPH JR., H. *Ethanol fuel : vehicular application technology*. São Paulo : Anfavea, Energy and Environment Division, 2005.
- _____. *Flex fuel technology in Brazil*. São Paulo : Anfavea, Energy and Environment Division, 2007.
- JUERGENS, I. « Can biofuels make a significant contribution to sustainable energy supply? ». *Biofuels – Global Issues*, The Foundation for Science and Technology, mai 2007.
- JUNGINGER, M. et al. « A growing role : opportunities, challenges and pitfalls of the biofuels trade ». *Renewable Energy World*, 2007.
- KARLSSON, M. *Integrated forest biorefinery*. « Latin America European Union Biofuels Research Workshop », Campinas , 2007.
- KEESE, W. J. *Transition from methyl tertiary-butyl ether to ethanol in California*. Washington : (Chairman of California Energy Commission), Congress of the United States, House of Representatives, Committee on Government Reform, Subcommittee on Energy Policy, Natural Resources and Regulatory Affairs, juillet. 2003.
- KOISUMI, T. *Biofuel policies in Asia*. « FAO Expert Meetings 5 and 6 », Rome, février 2008.
- LAMONICA, H. M. *Potencial de geração de excedentes de energia elétrica a partir da biodigestão da vinhaça*. Présenté au « VI Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – Agrener 2006 », Nipe, Unicamp, 2006.
- LANDELL, M. « ProCana – O Programa Cana-de-Açúcar do Instituto Agrônomo ». *O Agrônomo*, Campinas, v. 55 (1), 2003.
- LARSON, E. D. et al. *Large-scale gasification-based co-production of fuels and electricity from switchgrass*. Draft Manuscript to Biomass and Bioenergy, mars 2006.
- LARSON, E. D. et al. *Gasification based liquid fuels and electricity from biomass with carbon capture and storage*. Présenté a la « IV Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration », Alexandria, 2005.
- LARSON, E. D. et al. « A review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba ». *Energy for Sustainable Development*, v. V (1), 2001.
- LEAL, M. R. L. V. *Importância do álcool combustível na matriz energética brasileira*. Présenté au workshop « Álcool de Bagaço de Cana-de-Açúcar », Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, février 2005.

- _____. « The potential of sugarcane as an energy source ». *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, v. 26, 2007.
- _____. Informations aux auteurs, 2008.
- LEITE, R. C. C. *Proálcool, a única alternativa para o futuro*. Campinas : Unicamp, 1990.
- LORA, E. S. « Thermodynamics limits for the production of ethanol and electricity from sugarcane ». *Zuckerindustrie*, v. 131 (11), 2006.
- LowCVP. *Well-to-wheel evaluation for production of ethanol from wheat*. A Report by the LowCVP Fuels Working Group, WTW Sub-Group, Low Carbon Vehicle Partnership, Londres, 2004.
- LUCON, O. *Aspectos ambientais na cadeia de biocombustíveis*. Apresentado no workshop « Aspectos Ambientais da Cadeia do Etanol de Cana-de-Açúcar », Projeto Diretrizes de Políticas Públicas para a Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.
- LUENGO, J. M. et al. « Bioplastics from microorganisms ». *Current Opinion in Microbiology*, v. 6, 2003.
- LYND, L. R. *Tomorrow's biomass refineries*. Présenté au « XXVII Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals », Golden, Colorado, 2005.
- LYND, L. R. et al. « Likely features and costs of mature biomass ethanol technology ». *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 57/58, 1996.
- MACEDO, I. C. « The sugar cane agro-industry and its contribution to reducing CO₂ emissions in Brazil ». *Biomass and Bioenergy*, v. 3 (2), 1992.
- _____. « Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996) ». *Biomass and Bioenergy*, v. 14 (1), 1998.
- _____. (coord.). *Sugar cane's energy – Twelve studies on Brazilian sugar cane agribusiness and its sustainability*. São Paulo : Unica, 2005.
- _____. *Biomass as a source of energy*. Relatório preparado para o InterAcademy Council Study on « Transitions to Sustainable Energy Systems », septembre 2005.
- _____. « Cana-de-açúcar e energia renováveis no Brasil : a perspectiva tecnológica ». *Revista Opiniões*, número spécial sur les énergies renouvelables, avril-juin 2007.
- _____. Informações aos autores, 2008.

- MACEDO, I. C. & HORTA NOGUEIRA, L. A. « Balanço de energia na produção de açúcar e álcool nas usinas cooperadas ». *Boletim Técnico Copersucar*, v. 31/85, 1985.
- _____. « Biocombustíveis ». *Cadernos NAE 2*, Brasília, Centro de Gestão de Estudos Estratégicos e Núcleo de Assuntos Estratégicos (CGEE/NAE), 2005.
- _____. *Tecnologia e ciência para o desenvolvimento sustentável da bioenergia em São Paulo : cana-de-açúcar e outros vetores bioenergéticos*. Document préparé pour la « Comissão Especial de Bioenergia do Estado de São Paulo », São Paulo, août 2007.
- MACEDO, I. C. et al. *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil*. São Paulo : Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo, avril 2004.
- MACEDO, I. C. et al. *Geração de energia elétrica e de gás de síntese a partir de gaseificação de biomassa*. Funcamp/Unicamp-Nipe/LH2 et Petrobras/Cenpes-Finep, novembre 2006.
- MACEDO, I. C. et al. « Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil : The 2005/2006 averages and a prediction for 2020 ». *Biomass and Bioenergy*, v. 32 (4), 2008.
- MANDIOCA BRASILEIRA. *Sistema de Informações Agroindustriais da Mandioca Brasileira*. Disponible sur : <http://www.mandioca.agr.br>. Accès en : mars 2008.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Balanço nacional de cana-de-açúcar e agroenergia*. Brasília : Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia, 2007.
- _____. *Cronologia da mistura carburante (álcool anidro – gasolina)*. Brasília : Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Produção e Agroenergia, 2008.
- MARTINOT, E. *Renewables 2007 Global Status Report*. REN 21 Network, 2007. Disponible sur : http://www.martinot.info/RE2007_Global_Status_Report.pdf. Accès en : avril 2008.
- MCT – MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Mudanças climáticas*. Ministério de Ciência e Tecnologia, 2008. Disponible sur : <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/3881.html>. Accès en : mars 2008.
- MEARS, M. *Ethanol Transportation & Distribution*. Magellan Midstream Holdings, présentation Power Point pour Governors Ethanol Coalition, 2007.
- MEIRELLES, A. J. A. *Expansão da produção de bioetanol e melhoria tecnológica da destilação alcoólica*. Campinas : Unicamp, 2006.

MILANEZ, A. Y. et al. *Perspectivas para o etanol brasileiro*. Rio de Janeiro : Departamento de Biocombustíveis/BNDES, 2008.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balço Energético Nacional 2008/ano base 2007*. Rio de Janeiro : Ministério de Energia e Minas, Empresa de Pesquisa Energética, 2008.

MODERN MECHANIX, *Henry Ford discusses America's Industrial Future*, décembre 1934.

MOLIN, J. P. « Agricultura de precisão em cana-de-açúcar é mais do que uma realidade ». *Revista Coplana*, Guariba, janvier 2008.

MORAES, M. A. F. D. « Número e qualidade dos empregos na agroindústria da cana-de-açúcar ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005.

_____. « O mercado de trabalho da agroindústria canavieira : desafios e oportunidades ». *Economia Aplicada*, Ribeirão Preto, v.11 (4), 2007.

MOREIRA, J. R. *Water use and impacts due ethanol production in Brazil*. « Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries International Conference », Hyderabad, International Water Management Institute and Food and Agriculture Organization of the United Nations, janvier 2007.

MOREIRA, J. R. & GOLDEMBERG, J. « Política energética no Brasil ». *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 19 (55), 2005.

NASTARI, P. « Estrangeiros dobram participação em açúcar e álcool no Brasil ». Entretien auprès de la agence Reuters, 25.9.2007.

_____. *O mercado de etanol*. Apresentado no « I Simpósio Internacional de Combustíveis, Biocombustíveis e Emissões », Datagro, Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo, mai 2008.

NATIVE. *Projeto Cana Verde*. Disponible sur : http://www.nativealimentos.com.br/cana_verde. Accès en : mai 2008.

NCGA – NATIONAL CORN GROWERS ASSOCIATION. *Fossil energy use in the manufacture of corn ethanol*. National Corn Growers Association, 2008. Disponible sur : <http://www.ncga.com>. Accès en : mars 2008.

NEIVA EMBRAER. *Aeronave Ipanema – Vantagens do motor a álcool*. Disponible sur : http://www.aeroneiva.com.br/site/content/produtos/produtos_ipanema_vant_alc.asp. Accès en : mars 2008.

- NGUYEN, T. L. T. et al. « Energy balance and GHG-abatement cost of cassava utilization for fuel ethanol in Thailand ». *Energy Policy*, v. 35 (9), 2007.
- NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. *White paper on internationally compatible biofuels standards*. National Institute of Standards and Technology, 2008. Disponible sur : http://www.nist.gov/public_affairs/biofuels_report.pdf. Accès en : mars 2008.
- NONATO, R. V. « Plástico biodegradável a partir de açúcar ». Présenté au « V Workshop Internacional Brasil-Japão em Biocombustível, Meio Ambiente e Novos Produtos da Biomassa », Campinas, 2007.
- NONATO, R. V. et al. « Integrated production of biodegradable plastic, sugar and ethanol ». *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 57, 2001.
- NOVOZYMES. *Fuel ethanol production : technological and environmental improvements*. Novozymes & BBI International, 2002.
- NYBOT – NEW YORK BOARD OF TRADE. *Sugar prices – Contract No. 11*. New York Board of Trade, 2008. Disponible sur : <http://www.nybot.com/>. Accès en : janvier 2008.
- OCDE – ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. *Agricultural market impacts of future growth in the production of biofuels*. Paris : Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2007a.
- _____. *Economic survey of the European Union 2007 : reforming agricultural and trade support*. Paris : Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2007b.
- OLADE – ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA. *Sistema de Informaciones Económicas y Energéticas (SIEE)*. Quito : Organización Latinoamericana de Energía, 2006.
- ONDREY, G. « The path to biorefineries ». *Chemical Engineering*, v. 113 (4), 2006.
- ORBITAL ENGINE COMPANY. *A literature review based assessment on the impacts of a 10% and 20% ethanol gasoline fuel blend on non-automotive engines*. Orbital Engine Company, relatório para Environment Australia, 2002.
- ORTOLAN, M. C. A. *Relacionamento entre indústrias e fornecedores : mercado atual e futuro*. Présenté au « I Congresso de Tecnologia na Cadeia Produtiva em Mato Grosso do Sul », Canasul 2007, Campo Grande, 2007.
- OWEN, K. & COLEY, T. *Automotive fuels reference book*. 2^e éd. New York : Society of Automotive Engineers, 1995.
- PÁDUA RODRIGUES, A. Informações pessoais. Unica, novembre 2006.

- PESQUISA FAPESP. « Riqueza nas sobras das usinas ». *Revista Pesquisa Fapesp*, v. 76, juin 2002.
- PETROBRAS. *Produtos e Serviços – composição de preços, cadeia de comercialização e composição dos preços da gasolina e do óleo diesel no Rio de Janeiro*. Disponible sur : http://www2.petrobras.com/produtos_servicos/. Accès en : avril 2008.
- PHILIPPIDIS, G. P. & SMITH, T. K. « Limiting factors in the simultaneous saccharification and fermentation process for conversion of cellulosic biomass to fuel ethanol ». *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 51/52, 1995.
- PHILLIPS, S. et al. *Thermochemical ethanol via indirect gasification and mixed alcohol synthesis of lignocellulosic biomass*. Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2007 (Technical Report TP-510-41168).
- PIMENTEL, D. & PATZEK, T. W. « Ethanol production using corn, switchgrass, and wood ; biodiesel production using soybean and sunflower ». *Natural Resources Research*, v. 14 (1), 2005.
- PIRES, A. « Bicomcombustíveis serão 32% dos carros no Brasil em três anos ». Centro Brasileiro de Infra-Estrutura, entretien publié dans divers journaux, Rio de Janeiro, 26.4.2007.
- PIZAIA, W. *Steam economy improvement*. Relatório RLT-025 para MCT/PNUD. Projeto BRA/96/G31, Geração de Energia Elétrica por Biomassa, Bagaço de Cana-de-Açúcar e Resíduos, Brasília, 1998.
- PORDESIMO, L. O. et al. « Distribution of aboveground biomass in corn stover ». *Biomass and Bioenergy*, v. 26 (4), 2004.
- PROCANA. *Conheça o setor : dados da safra 2006/07*. Disponible sur : <http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/>. Accès en : mars 2008.
- RAGAUSKAS, A. J. et al. « The path forward for biofuels and biomaterials ». *Science*, v. 311, janvier 2006.
- RAUCH, R. *Biomass gasification to produce synthesis gas for fuel cells, liquid fuels and chemicals*. Technology Brief, IEA Bioenergy Agreement – Task 33 : Thermal Gasification of Biomass, 2002.
- REFUEL. *Eyes on the track, mind on the horizon (from inconvenient rapeseed to clean wood : a European road map for biofuels)*. Disponible sur : <http://www.refuel.eu/refuel-project/>. Accès en : mai 2008.
- REN21. *Renewables 2007 Global Status Report*. Washington : Worldwatch Institute, 2008.
- RFA – RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. *Annual Industry Outlook 2008*. Renewable Fuels Association, 2008. Disponible sur : <http://www.ethanolrfa.org>. Accès en : février 2008.

- RICCI JR., A. « Defensivos : herbicidas ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005b.
- _____. « Proteção de nascentes e cursos de água ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005a.
- RICUPERO, R. « Mais comida – e muitos mais comensais ». *O Estado de S. Paulo*, Caderno Aliás, 4 mai 2008.
- RIDESA. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. Disponible sur : <http://www.ridesa.org.br/>. Accès en : février 2008.
- RIRDC – RURAL INDUSTRIES RESEARCH AND DEVELOPMENT CORPORATION. *Sugar beet preliminary feasibility of ethanol production from sugar beet in NE Tasmania*. Canberra : Department of Primary Industries, Water and Environment, Rural Industries Research and Development Corporation, Australian Government, 2007.
- RISSARDI JR., D. J. & SHIKIDA, P. F. A. « A agroindústria canavieira do Paraná pós-desregulamentação : uma abordagem neoschumpeteriana », *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 45 (2), 2007.
- RODRÍGUEZ, A. G. « Seguridad alimentaria y biocombustibles ». Dans : *Biocombustibles como energía alternativa : una mirada hacia la región*. Quito : Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental, 2007.
- _____. « Information on biofuel commodity prices (based on World Bank data) ». Dans : CEPAL. *Unidad de desarrollo agrícola*. Santiago : Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2008.
- ROSSELL, C. E. V. & OLIVÉRIO, J. L. *Produção de álcool a partir do bagaço : o processo DHR – Dedini Hidrólise Rápida*. Dedini S/A Indústrias de base, Piracicaba, mars 2004.
- ROSSETTO, R. « A cultura da cana, da degradação à conservação ». *Visão Agrícola*, Esalq-USP, ano 1, 2004.
- SACHS, I. *Brasil : desafios da energia para o desenvolvimento sustentável*. Palestra proferida no Memorial da América Latina, São Paulo, mars 2007.
- SALIH, F. M. & ANDREWS, G. E. *The influence of gasoline/ethanol blends on emissions and fuel economy*. « Society of Automotive Engineers Fuel and Lubricants Meeting », San Francisco, 1992 (SAE Paper 922378).

- SCANDIFFIO, M. I. G. *Análise prospectiva do álcool combustível no Brasil – Cenários 2004–2024*. Campinas : Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005 (Thèse de Doctorat).
- SCANIA. « *New highly efficient diesel-ethanol engine – ready to cut fossil CO₂ emissions by 90%* » *Scania Press Info*, P07503EN, mai 2007.
- SCARAMUCCI, J. A. & CUNHA, M. P. « Aspectos sócio-econômicos do uso energético da biomassa de cana-de-açúcar ». Dans : CORTEZ, L. A. B. & LORA, E. E. S. *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. 3^e éd. Campinas : Unicamp, (sous presse).
- SCHUCHARDT, U. et al. « A indústria petroquímica no próximo século : como substituir o petróleo como matéria prima? ». *Química Nova*, v. 24, n. 2, 2001, pp. 247-251.
- SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL. « Mistura em pleno vôo : depois de inovar com o avião a álcool, país desenvolve motor aeronáutico flex fuel ». *Scientific American Brasil*, n. 44, janvier 2006.
- SEABRA, J. E. A. *Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações*. Campinas : Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008 (Thèse de Doctorat).
- SEABRA, J. E. A. & MACEDO, I. C. *Demanda de energia para a produção de PHB a partir do açúcar da cana*. Relatório preparado para PHB Industrial S.A., Campinas, 2006.
- SERÔA DA MOTTA, R. & FERREIRA, L. R. « The Brazilian National Alcohol Programme : an economic reappraisal and adjustments ». *Energy Economics*, juillet 1988.
- SILVESTRIN, C. R. *Dependência Elétrica de São Paulo : Desafios & Oportunidades*. São Paulo : Cogen-SP, Secretarias de Desenvolvimento e de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo, mars 2007.
- SMA – SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. « Vinhaça : critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola ». *Norma Técnica Cetesb P4.231*, Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2005.
- SMEETS, E. et al. « A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050 ». *Progress in Energy and Combustion Science*, doi :10.1016/j.pecs.2006.08.001, 2006.
- SMEETS, E. et al. *Sustainability of Brazilian bio-ethanol*. Utrecht/Campinas : Copernicus Institute/Utrecht University, Universidade Estadual de Campinas, 2006 (Report NWS-E-2006-110).
- SMIL, V. *General energetics : energy in the biosphere and civilization*. New York : Wiley, 1991.

- SOARES, M. L. Q. *Direitos humanos, globalização e soberania*. Belo Horizonte : Inédita, 1997.
- SOARES, R. A. B. *Uso da agricultura de precisão na Usina Jalles Machado*. Présenté au « Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão – Conbap 2006 », Piracicaba , 2006.
- SOPRAL – SOCIEDADE DE PRODUTORES DE AÇÚCAR E DE ÁLCOOL. *Avaliação de caminhões e tratores a álcool*. Coleção Sopral 3. São Paulo : Sociedade de Produtores de Açúcar e de Álcool, 1983.
- SOW-VU. *China's rapidly growing meat demand : a domestic or an international challenge?* Amsterdam : Center for World Food Studies, 2007.
- SOUZA, S. A. V. « Disponibilidade e uso de água no Brasil : irrigação ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005a.
- _____. « Vinhaça : o avanço das tecnologias de uso ». Dans : MACEDO, I. C. (org.). *A energia da cana-de-açúcar : doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade*. São Paulo : Unica, 2005b.
- STEENBLIK, R. *Liberalising trade in « environmental goods » : some practical considerations*. Paris : OCDE, 2005 (OECD Trade and Environment Working Paper No. 2005-05).
- STRAPASSON, A. « Governo prepara estudo para mapear áreas adequadas para plantio de cana-de-açúcar em grande escala » [Informations figurant dans la note]. *Inovação Unicamp*, 10 mars 2008.
- SUGRE. *Sustainable Green Fleets*, 2008. Disponible sur : <http://www.greenfleet.info>. Accès en : mars 2008.
- SUN, Y. & CHENG, J. « Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production : a review ». *Bioresource Technology*, v. 83, 2002.
- SZMRECSÁNYI, T. *O planejamento da agroindústria canavieira no Brasil (1930-1975)*. São Paulo : Hucitec, 1979.
- SZWARC, A. *Informações aos autores*. Unica, avril 2008.
- TEIXEIRA, C. G. et. al. « Utilização do sorgo sacarino como matéria-prima complementar à cana-de-açúcar para obtenção de etanol em micro-destilaria ». *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v.17 (3), 1997.
- TEREOS. *Bio-ethanol*. Disponible sur : <http://www.tereos.com>, Accès en : mai 2006.

- THE HOUSE OF COMMONS. « Are biofuel sustainable? ». *First Report of Session 2007–08*, Environmental Audit Committee, Londres, 2008.
- TOYOTA. *Support for diversification of alternative fuels*. Toyota Technology, 2007. Disponible sur : <http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/powertrain/>. Accès en : novembre 2007.
- TRINDADE, S. *Fuel ethanol issues in thailand : ethanol production, stillage disposal and market penetration*. Report to UN/DTCD (draft), New York, 1985.
- TSB – TRANSPORTATION SYSTEMS BRANCH. *Use of higher than 10 volume percent ethanol/gasoline blends in gasoline powered vehicles*. Ottawa : Transportation Systems Branch, Air Pollution Prevention Directorate, Environment Canada, 1998.
- TURKENBURG, W. C. et al. « Renewable energy technologies ». Dans : GOLDEMBERG, J. (édit.). *World energy assessment of the United Nations*. Capítulo 7. New York : UNDP, Undesa/WEC.UNDP, 2000.
- TURNER, T. « Biofuels, agriculture and the developing world ». Dans : *Linking trade, climate change and energy*. Geneva : ICTSD, 2006. Disponible sur : http://www.trade-environment.org/output/ictsd/resource/Energy_issuebriefs.pdf. Accès en : avril 2008.
- ULATE, W. *Perspectivas de uso actual y futuro de etanol carburante en Costa Rica*. San José : Refinería Costarricense de Petróleo, 2006.
- UNDP – UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM. *Human development report 2007/2008 – Fighting climate change : human solidarity in a divided world*. New York : United Nations Development Program, 2007.
- UN-ENERGY. *Sustainable bioenergy : a framework for decision makers*. Nova York : United Nations, 2007. Disponible sur : <http://esa.un.org/un-energy/pdf/susdev.Biofuels.FAO.pdf>. Accès en : mai 2008.
- UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM. *Working papers 2007*. United Nations Environmental Program, 2008. Disponible sur : www.unep.org. Accès en : mars 2008.
- UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. *Kyoto Protocol*. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2008. Disponible sur : http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. Accès en : avril 2008.
- UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. *Produção e uso do etanol combustível no Brasil : respostas às questões mais freqüentes*. São Paulo : União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2007.

- _____. *Estatísticas*. União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2008. Disponible sur : <http://www.portalunica.com.br>. Accès en : janvier 2008.
- UNITED NATIONS. *Our common future*. New York : World Commission on Environment and Development, 1987.
- UPME – UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. *Los biocombustibles en Colombia*. Bogotá : Ministerio de Energía y Minas, Unidad de Planeación Minero Energética, 2006.
- URQUIAGA, S. et al. *A importância de não queimar a palha na cultura da cana-de-açúcar*. Seropédica : Embrapa, Centro Nacional de Pesquisa de Biologia do Solo, 1991.
- USDA – UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Data and Statistics*. United State Department of Agriculture, 2008. Disponible sur : <http://www.usda.gov>. Accès en : février 2008.
- VAN DER LAAN, G. P. *Kinetics, selectivity and scale up of the Fischer-Tropsch Synthesis*. Groningen : University of Groningen, 1999 (Thèse de Doctorat).
- VARGAS, M. *História da técnica e da tecnologia no Brasil*. São Paulo : Unesp, 1994.
- VENTURI, P. & VENTURI, G. « Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems ». *Biomass and Bioenergy*, v. 25 (3), 2003.
- VIEIRA, M. C. A. et al. *Setor sucroalcooleiro brasileiro : evolução e perspectivas*. Rio de Janeiro : Deagro/BNDES, 2006.
- WALTER, A. C. S. & ENSINAS, A. *Produção de eletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar*. Présenté au *workshop* « Abimaq », Ribeirão Preto, 2006.
- WALTER, A. C. S. & HORTA NOGUEIRA, L. A. « Produção de eletricidade a partir da biomassa ». In : CORTEZ, L. A. B. & LORA, E. E. S. *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. 2^e éd. Manaus : Universidade do Amazonas, 2007.
- WASTE ONLINE. *Plastics recycling information sheet*. Disponible sur : <http://www.wasteonline.org.uk>. Accès en : février 2008.
- WERPY, T. A. et al. *Top value added chemicals from biomass*. Présenté au « XXVII Symposium on Biotechnology for Fuels », Golden, Colorado, 2005.
- WHIMS, J. *Pipelines considerations for ethanol*. Sparks Companies, Inc., Agricultural Marketing Resource Center, Kansas State University, 2002.
- WHITE HOUSE. *New Energy Act 2007*. Disponible sur : <http://www.whitehouse.gov/news/releases/2007/12/20071219-1.html>. Accès en : avril 2008.

- WILLIAMS, R. H. et al. *Low-carbon liquid fuel and electricity from coal and crop residues with CO₂ capture and storage*. Présenté au GCEP International Workshop (Stanford University, Tsinghua University and Zheijiang University), Beijing, 2005.
- WOLF, J. et al. « Exploratory study on the land area required for global food supply and the potential global production of bioenergy ». *Agricultural Systems*, v. 76 (3) 2003.
- WOOLEY, R. et al. *Lignocellulosic biomass to ethanol – Process prehydrolysis and enzymatic hydrolysis – Current and futuristic scenarios*. Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 1999 (Report TP-580-26157).
- WORLD BANK, *Rising food prices : Policy options and World Bank response*. Washington : World Bank, 2007a.
- _____. *World Development Report 2008*. Washington : World Bank, 2007b.
- _____. *A 10-point plan for the food crisis*. Washington : World Bank, 2008.
- WYMAN, C. E. *Handbook on bioethanol : production and utilization*. Applied Energy Technology Series. Washington : Taylor & Francis, 1996.
- _____. « What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol ». *Trends in Biotechnology*, doi :10.1016/j.tibtech.2007.02.009, 2007.
- YACOBUCCI, B. D. « Ethanol imports and the Caribbean Basin Initiative ». *CRS Report for Congress*, 2006.
- YACOBUCCI, B. D. & WOMACH, J. « Fuel ethanol : background and public policy issues ». *CRS Report for Congress*, n. RL30369, Summary, 21 février 2002.
- ZACCHI, G. *The state of the art and future trends of ligno-cellulose biomass conversion to ethanol*. Apresentado na Unicamp, Campinas, février 2007.

Coordination éditoriale
Gerência de Editoração do BNDES

Projet graphique
Ana Luisa Silveira Gonçalves

Edition électronique
Abreu's System

Impression
Imprinta Express Gráfica e Editora

Les photos d'ouverture des chapîtres ont été cédées
gracieusement par Unica, Iaco Agrícola et Santelisa Vale.

Le contenu des chapîtres est de la responsabilité
exclusive des auteurs, tandis que la coordination
éditoriale et le projet graphique incombent au BNDES.