

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARBURANTS VÉGÉTAUX ET ÉTHANOL-MAÏS : ANALYSE DES IMPACTS
SOCIO-ENVIRONNEMENTAUX

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

NICOLAS ROY

MAI 2009

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT-PROPOS

Nos interrogations, qui se sont développées et étayées à travers l'évaluation des impacts environnementaux et sociaux de ces deux générations de carburants végétaux, témoignent non seulement de la complexité d'une telle problématique, mais de l'importance d'une analyse globale et approfondie permettant d'éviter de s'emballer pour des alternatives qui n'en sont pas, qui ne le sont au mieux que partiellement et dont les impacts sont souvent pires que les problèmes trop souvent mal posés qu'elles étaient censées résoudre. Ainsi, au moment de terminer ces lignes, nous apprenions que le Congrès des ÉU venait de voter une diminution de 12% des subventions à la production d'éthanol à partir du grain. Au Canada, le parti du Bloc québécois venait de rejoindre les rangs du Nouveau parti démocratique, s'opposant à la mise en œuvre du projet de loi C-33, donnant au gouvernement, par voie réglementaire, le pouvoir d'imposer un pourcentage minimal d'éthanol dans l'essence. Malgré cette opposition, ce projet de loi a toutefois été adopté en deuxième lecture par le gouvernement conservateur minoritaire avec l'appui du Parti libéral du Canada, puis adopté par le Comité sénatorial permanent de l'énergie, de l'environnement et des ressources naturelles le 26 juin 2008.

Vivre la rédaction d'un mémoire n'est pas de tout repos. Dans mon cas, ce projet a été happé par le tourbillon d'une soudaine prise de conscience de l'ampleur et de l'urgence de la problématique des carburants végétaux. Devant la vive controverse suscitée par les carburants végétaux, j'ai eu constamment l'impression d'être à la fois au cœur d'un objet témoignant fort bien des contradictions de l'époque tout en ayant l'impression d'être constamment dépassée par la multitude des informations contradictoires autour de ce sujet si passionnément controversé. Cette impression a été renforcée par la rapidité avec laquelle j'ai dû faire ce mémoire, qui, de la construction de sa problématique à sa rédaction, en passant par la revue de littérature, s'est effectué en un an environ, dans des délais évidemment plus courts que normal, cela pour des raisons qui furent parfois hors de mon contrôle.

Ce mémoire n'aurait pu être réalisé sans l'aide précieuse, les conseils, les encouragements, les patientes corrections et la confiance de ma directrice Louise Vandelac, professeure titulaire au département de sociologie, rattachée à l'Institut des sciences de l'environnement de l'UQÀM et chercheure au CINBIOSE. Je tiens à la remercier mille fois de m'avoir incité à travailler sur la problématique des carburants végétaux et de m'avoir permis de réaliser ce mémoire, et cela en fin de parcours, dans des délais fort serrés.

Je tiens également à remercier Claude Hamel, professeur retraité du département de sciences biologiques de l'UQAM et spécialiste de la biodiversité ainsi que Éric Darier, directeur de la campagne OGM et Agriculture durable de Greenpeace et Chargé de cours au département de science politique de l'UQÀM, qui ont généreusement accepté de faire partie du comité d'évaluation de ce mémoire.

Mon aventure rédactionnelle ne fut pas un long fleuve tranquille et mon parcours fut jalonné de longs méandres tortueux. Je tiens donc à ce que les sourires et les épaules, les supports et les encouragements, les accolades et les bousculades, les bouts de ficelle, les tasses de thé, les contes, la musique et les autres fuites, de tous ces gens qui ont permis cette traversée de l'océan en soient remerciés : Annie Léger, ma bonne amie et ma collègue de bureau pour nos « éternelles discussions existentielles » ; mes nombreux amis, que j'aime et qui m'ont permis de survivre aux angoisses et aux difficultés de la maîtrise dont les noms sont lancés ici en tir groupé : Martin, Germain, Magali, Vincent, Édith, Mathieu, Henri-George, et tant d'autres qui se reconnaîtront très certainement ; les Unijambistes, pour notre musique, nos heurts et nos partages créatifs ; Jacques et Christiane, mes parents, pour leur support indéfectible et pour m'avoir fait échevelé comme je suis ; Justin, ma grande fratrie à lui tout seul ; et finalement, Sonia, mon amoureuse, pour sa présence et sa patience, ses arabesques et son amour.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	III
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES ACRONYMES	XIII
RÉSUMÉ	XVII
INTRODUCTION	I
CHAPITRE I LA PROBLÉMATIQUE DES CARBURANTS VÉGÉTAUX	9
1.1 Les carburants végétaux en général	10
1.1.1 Les carburants végétaux.	12
1.1.2 Les principales carburocultures : biodiesel et éthanol	15
1.2 Quelques données relatives aux carburants végétaux	17
1.2.1 Les carburants végétaux dans le monde	17
1.2.2 L'augmentation des besoins énergétiques	20
1.3 Les carburants végétaux d'Amérique du Nord. Le cas exemplaire de l'éthanol-maïs	23
1.3.1 Le contexte états-unien	24
1.3.2 Le contexte canadien	26
1.4 Les carburants végétaux présentés comme une énergie propre, verte et renouvelable	28
1.5 La figure de l'expert dans la controverse des carburants végétaux	32
1.6 Synthèse de la problématique : l'objet de recherche	33
CHAPITRE II ORIENTATIONS MÉTHODOLOGIQUES	39
2.1 Les outils de recherche	42
2.1.1 La revue de littérature	42
2.1.2 La revue de la littérature et la collecte des données	45

2.2 Le traitement qualitatif des discours écrits	46
CHAPITRE III LES IMPACTS DE LA PRODUCTION D'ÉTHANOL À PARTIR DU MAÏS-GRAIN	49
3.1 La production d'éthanol-maïs	49
3.1.1 Le bilan des émissions de gaz à effet de serre de l'éthanol-maïs : une énergie propre?	49
3.1.2 La valeur énergétique de l'éthanol-maïs : Un carburant vert?	56
3.1.3 L'éthanol-maïs en tant qu'énergie renouvelable	62
3.1.4 Un premier constat	66
3.2 Les conséquences socio-environnementales de la production d'éthanol-maïs	68
3.2.1 L'agriculture intensive, l'érosion et la dégradation des sols	69
3.2.2 L'eutrophisation, la qualité des eaux et les quantités d'eau requises	71
3.2.3 Des conséquences sur la biodiversité	73
3.2.4 La qualité de l'air et la santé humaine	76
3.2.5 Un enjeu de sécurité énergétique	77
3.2.6 L'éthanol-maïs en tant qu'agent de développement économique	80
3.2.7 La hausse du prix des denrées et la sécurité alimentaire	83
3.2.8 Un deuxième constat	86
CHAPITRE IV LA PRODUCTION D'ÉTHANOL À PARTIR DE LA PAILLE DE MAÏS : UN CHOIX VIABLE?	91
4.1 Les défis de l'éthanol-maïs cellulosique.	93
4.1.1 L'augmentation potentielle de la production mondiale d'éthanol	94
4.1.2 Le défi technologique du développement des cultures énergétiques cellulosiques	99
4.2 La production d'éthanol-maïs cellulosique	103
4.2.1 Le bilan de gaz à effet de serre de l'éthanol-maïs cellulosique	103
4.2.2 La valeur énergétique de l'option cellulosique	104
4.2.3 Une énergie renouvelable	106
4.3 Les conséquences socio-environnementales potentielles de l'option cellulosique	109
4.3.1 La récolte des résidus agricoles, l'érosion et la dégradation des sols	110
4.3.2 La pression sur les écosystèmes naturels	112
4.3.3 Les organismes génétiquement modifiés et l'intégrité de la biodiversité.	114
4.3.4 La qualité de l'air et la santé humaine	117

4.3.5 La sécurité énergétique et les coûts de production	118
4.3.6 La sécurité alimentaire et l'option cellulosique	122
4.4 Un troisième constat : l'alibi d'une promesse technologique	124
CONCLUSION	129
APPENDICE A	139
RÉFÉRENCES	147

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	L'évolution de la production mondiale d'éthanol, en millions de litres, entre 1975 et 2005	19
Figure A.1	Différentes estimations de valeurs de BEN (<i>NEV</i>) à travers le temps en ML/J de l'éthanol-maïs	140
Figure A.2	Différentes estimations de valeurs de BEN en MJ/L pour l'éthanol-maïs en fonction de l'énergie fournie (<i>output</i>) et de l'énergie requise à sa production (<i>input</i>), selon six études. La valeur estimée du BEN pour chaque étude est indiquée par l'emplacement d'un point noir	141
Figure A.3	Représentation schématique des impacts de la production et l'usage de l'éthanol sur l'environnement	142
Figure A.4	Évolutions des prix mondiaux des produits végétaux jusqu'en 2016	143
Figure A.5	Schéma synthétique de l'hydrolyse de la biomasse végétale en ses principaux composés (lignine, cellulose et hémicellulose)	144
Figure A.6	Les différents usages des résidus agricoles	145
Figure A.7	Les effets à court terme et à long terme du retrait des résidus agricoles	146

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Différentes estimations de BEN de l'éthanol-maïs observées dans la littérature scientifique	57
Tableau 3.2	Différentes estimations de rendement énergétique de l'éthanol-maïs observées dans la littérature scientifique	58
Tableau 4.1.	Le potentiel régional de la production d'éthanol à partir de la paille de maïs	95
Tableau 4.2.	Rendements énergétiques comparés de l'éthanol-maïs cellulosique et de l'éthanol-maïs dans la littérature scientifique	105

LISTE DES ACRONYMES

ACCR	Association canadienne des carburants renouvelables
ACI	Les Alcools de Commerce inc.
ADM	Archer Daniels Midland Compagny
AIE	Agence internationale de l'énergie
ALDH	Aldéhyde deshydrogénase
ASPO	Association pour l'étude du pic de pétrole et de gaz naturel
BD20	Carburant diesel composé à 20% de biodiesel
BEN	Bilan énergétique net
BP	British Petroleum
CEO	Corporate Europe Observatory
COD	Carbone organique dissous
CQB	Conseil québécois du biodiésel
E0	Carburant composé à 100% d'essence
E10	Carburant composé d'un mélange de 90% d'essence et de 10% d'éthanol
E85	Carburant composé d'un mélange de 15% d'essence et de 85% d'éthanol
E100	Carburant composé à 100% d'éthanol

ÉU	États-Unis
EWG	Energy Watch Group
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IIEB	Initiative pour un investissement écoagricole dans les biocarburants
IMBP	Initiative des marchés de biocarburants pour les producteurs
MMT	Méthylcyclopentadiényl manganèse tricarbonyle (additif pour carburant)
MTBE	Éther méthylique ter-butylique (additif pour carburant)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OGM	Organisme génétiquement modifié
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
OPEP	Organisation des pays exportateurs de pétrole
PEÉ	Programme d'expansion de l'éthanol
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
PPN	Productivité primaire nette
RFA	Renewable Fuels Association
UE	Union Européenne
USDA	United States Department of Agriculture

USDOE United States Department of Energy

USSenate United States Senate

VUS Véhicules utilitaires sport

WI Worldwatch Institut

RÉSUMÉ

Les crises combinées du pétrole, de la biodiversité et des changements climatiques, exigeant, entre autres, la réduction de l'usage des carburants fossiles, font du développement d'énergies alternatives un enjeu majeur. Si bien que l'éthanol, dont la production mondiale a atteint plus de 65 milliards de litres en 2008, constitue désormais un élément clé de la stratégie énergétique de nombreux pays, et que le Canada et les États-Unis (ÉU) le présentent même pour limiter les changements climatiques. Essentiellement dérivées du maïs, les productions d'éthanol aux ÉU – premier producteur mondial de carburants végétaux – étaient d'environ 34 milliards de litres en 2008 comparées à 900 millions de litres au Canada. Certes, bien que la production de carburants végétaux, ne représente qu'environ 1% de l'ensemble des carburants liquides destinés aux transports dans le monde, elle est néanmoins de plus en plus sujette à controverse. L'aggravation de la crise alimentaire mondiale remet en effet en question cette filière énergivore reposant essentiellement sur des cultures agricoles, notamment le maïs, destinées initialement à l'alimentation. Cette controverse socio-environnementale contribue d'ailleurs au développement d'une 2^{icme} génération de carburants végétaux, dérivée de la cellulose végétale, à qui on promet un avenir bien meilleur, alors que rien n'est moins sûr.

La transformation croissante des ressources végétales en énergie destinée aux transports devrait exiger une évaluation approfondie de leurs impacts socio-environnementaux. Or, très peu d'études permettent de dégager un portrait global des carburants végétaux de 1^{ere} génération déjà en production, et de ceux de 2^{icme} génération, toujours en développement. En outre, les plus récents projets de loi au Canada (C-33) et aux ÉU (le *US Energy Bill* de 2007) favorisent davantage encore le déploiement de ces filières en permettant d'imposer des taux minimums d'éthanol dans l'essence au Canada et en fixant des objectifs nationaux de production (estimés aux É-U à 136 milliards de litres de carburants renouvelables en 2022).

Dans ce contexte, ce mémoire vise à analyser dans quelle mesure les carburants végétaux peuvent être considérés, en partie ou en totalité, comme des alternatives viables aux carburants fossiles. Pour ce faire, nous examinerons notamment les impacts socio-environnementaux des carburants végétaux de 1^{ere} et de 2^{icme} génération, à travers les études de cas spécifiques de l'éthanol-maïs et de l'éthanol cellulosique principalement issu de la paille de maïs, deux productions largement développées ou en développement aux ÉU et au Canada. Ce travail de recherche et d'analyse s'appuie sur une importante revue de littérature scientifique, permettant d'appréhender dans toute sa complexité l'évolution des carburants végétaux et notamment la transition amorcée vers ceux de 2^{icme} génération. Comme nous le verrons au fil du texte, la production et l'usage d'éthanol-maïs ont des conséquences socio-environnementales majeures, tant sur la qualité des sols, de l'eau et de l'air, qu'au plan de la biodiversité et de la sécurité énergétique et alimentaire, et elles présentent donc plus de désavantages que de bénéfices. Quant à l'option cellulosique, centrée sur le développement de cultivars à plus fort ratio cellulose/lignine et de microorganismes permettant la transformation de la cellulose en éthanol, elle présente autant sinon plus de risques notamment

en termes de baisse de productivité des sols agricoles et de risques de contamination génétique des autres variétés végétales naturelles et cultivées. Dans la mesure où ce recours aux carburants végétaux s'inscrit dans une optique incrémentale, modifiant à la marge un aspect relativement mineur de la complexe question de la croissance du transport routier et d'un parc automobile nord-américain particulièrement énergivore, il est fort risqué que l'emballement pour l'option cellulosique accélère sa mise en marché avant que toutes les évaluations requises n'aient été faites, au risque alors de conséquences inattendues, mais aussi importantes que les problèmes qu'on a voulu ainsi éviter ou résoudre.

Mots clés : biocarburant, carburants végétaux, éthanol-maïs, éthanol cellulosique, paille de maïs, sécurité alimentaire, sécurité énergétique

INTRODUCTION

L'éthanol est actuellement un des éléments clés de la stratégie énergétique de nombreux pays, dont le Canada et les États-Unis qui ont, jusqu'à tout récemment encore, essentiellement misé sur le développement d'une production d'éthanol fabriqué à partir du maïs-grain. Dans l'actuel contexte de crises combinées du pétrole, de la biodiversité et des changements climatiques, la réduction de l'usage des carburants fossiles exigeant, entre autres, le développement d'énergies alternatives constitue un enjeu majeur.

Jusqu'à maintenant, la filière de l'éthanol s'est essentiellement basée sur des cultures agricoles également destinées à l'alimentation, comme le maïs, la canne à sucre, le soja et le blé. Les bénéfices qu'on attribue généralement aux carburants végétaux de 1^{ère} génération d'éthanol s'effritent toutefois progressivement devant les torts socio-environnementaux qu'ils provoquent, alors qu'un bilan négatif des conséquences de la 1^{ère} génération se confirme de plus en plus.

Cependant, des technologies, basées en bonne partie sur la transgénèse, permettant d'optimiser la transformation de la cellulose en éthanol, progressent rapidement, faisant rêver plusieurs à l'accès d'un immense bassin de sucre destiné à la fermentation. Parce que ces technologies ne sont toujours pas au point et qu'elles ne permettent pas une production commerciale d'éthanol cellulosique, on ne connaît pas les impacts de la production et de l'usage de la 2^{ème} génération. Les informations sur cette génération de carburants végétaux laissent toutefois présager des impacts socio-environnementaux non négligeables. La voie de l'éthanol, de plus en plus promue au titre d'alternative partielle aux carburants fossiles par les pouvoirs publics et par l'industrie, risque d'engendrer plus de torts sociaux et environnementaux que les bénéfices qu'elle est supposée apporter.

L'or vert, comme certains se plaisent à nommer l'éthanol produit à partir des végétaux, a été progressivement promu au titre d'alternative aux carburants fossiles. En outre, les États-Unis ont

notamment, depuis les années 1980, fait de la culture du maïs leur moyen d'à la fois chercher à augmenter leur performance environnementale et leur sécurité énergétique. Plusieurs programmes, mis en place dans les années 1980 et 1990, ont fait de l'éthanol-maïs le nouvel additif à l'essence, dans le but de remplacer le MTBE alors reconnu comme un important polluant atmosphérique (Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007). Plus encore, leurs pouvoirs publics ont mis en place divers programmes de subvention et d'incitation à la production d'éthanol-maïs, s'appuyant sur l'idée d'accroître de manière substantielle leur indépendance énergétique envers un pétrole d'importation en axant cette démarche sur la production et la consommation d'un carburant domestique. En outre, Frigon (2007) note trois autres facteurs qui expliquent l'expansion de cette production à partir du maïs aux ÉU : (i) une réglementation fixant un contenu minimal d'éthanol dans l'essence; (ii) le prix de plus en plus élevé des carburants fossiles; et (iii) la faiblesse des prix du maïs.

En 2007, les ÉU sont devenus le plus grand producteur mondial d'éthanol, dépassant à ce titre le Brésil, qui tire sa production principalement de la canne à sucre. La production d'éthanol était de plus de 34 milliards de litres en 2008 (RFA, 2009b). Au mois de mai de l'année 2007, le gouvernement des ÉU indiquait vouloir accroître de 3 à 15% la part d'éthanol dans l'essence (Bush, 2007a) et vouloir faire accroître à 136 milliards de litres la production de carburants renouvelables d'ici 2022, 57 milliards serait issus du maïs-grain et le reste principalement de la biomasse végétale telle que les résidus agricoles (USSenate, 2007).

Au Canada, la loi C-33, adoptée le 26 juin 2008 par le Comité sénatorial permanent de l'énergie, de l'environnement et des ressources naturelles, permettrait d'imposer un contenu minimal de 5% d'éthanol dans l'essence conventionnelle d'ici 2010 (Banks, 2008), équivalant à une production annuelle de 2,74 milliards de litres alors que celle de 2008 était de 900 millions de litres (RFA, 2009b), soit plus de trois fois plus. Au Québec, la mise en marche d'une raffinerie à Varennes le 7 juin 2007 permet de produire 120 millions de litres d'éthanol-maïs par an (ACCR, 2007; Québec, 2007).

Il existe plusieurs types de carburants végétaux déjà mis en marché ou en voie de développement. Actuellement sur le marché, les carburants végétaux de 1^{ère} génération sont produits à partir de sucre (amidon, sucrose) et d'huiles végétales. Ceux-ci sont généralement issus de cultures aussi destinées à la production alimentaire, comme le maïs, le blé, la canne à sucre, ainsi que le canola,

le soya et le palmier à huile. Les bénéfices environnementaux, énergétiques et sociaux de la production d'éthanol et de biodiesel à partir de ces végétaux sont toutefois de plus en plus remis en question.

En Amérique du Nord, plusieurs ont élevé l'éthanol-maïs au rang d'alternative partielle aux carburants fossiles. Dans la lutte au réchauffement climatique, son usage permettrait de réduire une part importante des émissions de GES reliées aux transports (AIE, 2004; Shapouri, Duffield et Wang, 2002; USDA, 2005; USDOE, 2006). La production d'un carburant domestique fournirait la possibilité de diminuer la dépendance au pétrole d'importation et d'accroître la sécurité énergétique nationale. Aux ÉU, les importations de pétrole représentent environ 60% de la consommation nationale de carburants destinés aux transports (USDOE, 2006), dont une part importante en provenance de l'Angola, du Gabon, du Moyen-Orient, du Nigeria et du Venezuela, des régions du monde souvent considérées instables et hostiles. La production d'un carburant domestique bénéficierait à l'économie nationale, en diminuant les dépenses pour un pétrole étranger et en diversifiant l'offre de revenus pour les agriculteurs (RFA, 2008a). Avec environ 275 millions de tonnes produites en 2006 (OCDE/FAO, 2007), la culture du maïs est la première production agricole aux ÉU, représentant à elle seul plus des trois quarts de la production céréalière aux ÉU (335 millions de tonnes en 2006) (USDA-FAS, 2008).

Toutefois, la littérature fait de plus en plus place à un discours beaucoup plus critique à l'égard d'une option présentant davantage d'impacts négatifs que de bénéfices. De nombreux auteurs soutiennent aujourd'hui que la production d'éthanol-maïs nécessite plus d'énergie, pour sa culture, son transport et sa conversion, que celle qu'elle fournit lors de sa combustion. Elle ne pourrait pas non plus permettre aux ÉU de diminuer réellement leur dépendance à un pétrole étranger. Elle risquerait même de renforcer encore plus cette dépendance. Son bilan d'émissions de GES serait également mitigé, alors que la conversion du maïs en éthanol et sa combustion réduiraient peu les émissions de GES. Pour certains auteurs, la production et l'usage d'éthanol-maïs seraient même pires globalement que celles des carburants fossiles (Patzek, 2006a; Uihlein, Ehrenberger et Schebek, 2007).

Les impacts sociaux de la production de plus de 65 milliards de litres de carburants végétaux sont rarement inclus dans les études évaluant ses effets sur l'environnement. Pourtant, c'est près de 20% de la récolte états-unienne de maïs qui est transformée en éthanol (Leibtag, 2008 ;

OCDE/FAO, 2007; Pimentel et Patzek, 2006). Or, ce maïs est la plus importante culture agricole aux ÉU et qui correspond à près de 40% de la production mondiale de maïs (Kim et Dale, 2004). Alors que l'importance toute récente de la montée du prix des denrées permet de mettre en lumière les effets du détournement de cultures alimentaires vers une production énergétique et sa participation à la crise alimentaire mondiale actuelle, mentionnons tout de même que ces torts sont largement alimentés par une production d'éthanol-maïs qui ne correspond qu'à un peu plus de 1% de la consommation de carburants destinés aux transports aux ÉU (Pimentel et Patzek, 2006).

La controverse enveloppant la 1^{ère} génération de carburants végétaux place au-devant de la scène une seconde génération de carburants végétaux, produits principalement à partir de la cellulose, qui correspond pour plusieurs à un immense bassin de sucre fermentable. À travers cette option, c'est l'ensemble du monde végétal qui est vu fermentable. Comme nous le verrons, on dit notamment d'elle, très certainement à tort, qu'elle permettrait d'éviter les conflits d'usage des terres agricoles entre cultures alimentaires et cultures énergétiques.

Les technologies de conversion de la cellulose en éthanol ne sont toutefois pas encore au point, ne permettant toujours pas encore de soutenir une réelle production industrielle commerciale. La cellulose est beaucoup plus complexe à convertir en éthanol que des sucres plus simples, comme le glucose contenu dans le sucrose de la canne à sucre et l'amidon du maïs-grain. Pour connaître le succès que les pouvoirs publics ainsi que les industrielles du pétrole et de l'agroalimentaire annoncent, l'option cellulosique dépend d'organismes qui seraient en mesure d'optimiser la conversion de la cellulose en éthanol. Toutefois, rares sont les organismes qui sont en mesure de convertir la cellulose en éthanol et aucun d'eux ne tolère des concentrations suffisamment élevées d'éthanol dans leur milieu pour supporter une production importante. S'il en existait déjà dans la nature, il est fort à parier que brasseurs et autres fabricants d'alcool l'auraient déjà trouvé. En outre, les autres composés structurels que l'on retrouve dans la biomasse végétale, principalement la lignine, rendent difficile l'accès à la cellulose à cause des fortes interactions qu'ils entretiennent entre eux. Pour arriver à cette fin, les scientifiques s'emploient donc, à l'aide de la transgénèse, au développement de lignées de microorganismes voués spécifiquement à digérer de nouvelles variétés végétales, elles-mêmes développées pour leur ratio plus élevé cellulose/lignine.

Il existe plusieurs sources de biomasses végétales permettant de produire de l'éthanol cellulosique (résidus agricoles et forestiers, cultures pérennes, sylvicultures énergétiques). En revanche, les procédés de conversion de la cellulose en éthanol exigent une source relativement homogène de biomasse végétale pour supporter une production commercialement viable. De ces sources, les résidus agricoles représentent celle qui est la plus susceptible de répondre rapidement aux attentes. Les résidus agricoles sont généralement disponibles en assez grandes quantités, ce qui permettrait de supporter une production commerciale.

Or, avant même sa mise en œuvre, cette option est déjà sujette à controverse. Sans aucun doute, les résidus agricoles sont la plus importante source homogène de biomasse végétale dont nous pourrions disposer actuellement pour une production commerciale d'éthanol cellulosique.

À court et à moyen terme aux ÉU, cette voie repose fortement sur la paille de maïs (les résidus de la culture du maïs), trop souvent considérés comme des déchets agricoles sous-valorisés dans le modèle agro-industriel productiviste qui domine l'agriculture. L'important volume de résidus agricoles laisse croire qu'ils pourraient remplacer plus du quart de la consommation mondiale de carburants fossiles (Kim et Dale, 2004).

Cependant, le retrait des champs des résidus risque d'entraîner de nombreuses conséquences sur les sols, dont une érosion accrue des sols et la perte de leur productivité. En outre dans le cas des cultures énergétiques pérennes et de la sylviculture énergétique, l'augmentation de la demande énergétique ainsi que la mise en exploitation de nouvelles terres agricoles risquent d'accentuer encore plus la pression sur la biodiversité et les écosystèmes naturels. Les conflits d'usage pour la terre, entre cultures alimentaires et cultures énergétiques, risquent d'être également davantage marqués.

Alors que les technologies de conversion ne sont toujours pas effectives, les coûts actuels de production de l'éthanol cellulosique, eux, demeurent trop élevés. En plus d'un bilan énergétique négatif et d'émissions de GES mitigé, le déploiement technologique de la filière cellulosique, afin d'augmenter l'efficacité de la conversion de la cellulose et de faire diminuer ses coûts de production, s'appuie essentiellement sur la manipulation génétique de microorganismes et de variétés végétales, rappelant tous les risques que les OGM peuvent évoquer.

Objectifs et pertinence de ce mémoire

Peu de travaux se sont encore penchés sur les enjeux d'une transition vers les carburants végétaux de 2^{ième} génération et ce mémoire fait très certainement partie des premiers travaux qui s'intéressent à l'ensemble de leur problématique. C'est là, la pertinence de ce mémoire donc, qui est en outre réalisé à un moment charnière où on fait mondialement la promotion des carburants végétaux dont on cherche à accélérer le développement et le déploiement.

Jusqu'à tout récemment encore, les enjeux de la production des carburants de 1^{ère} génération restaient sommes toutes relativement marginaux. Ce n'est que dernièrement, plus particulièrement à la faveur de la prise de conscience d'une grave crise alimentaire mondiale et de la hausse drastique du prix des denrées, que nous avons pu collectivement prendre conscience de l'ampleur des tenants et des aboutissants des carburants de 1^{ère} génération, en particulier de l'éthanol-maïs. Nous souhaitons donc que ce mémoire contribue à poser un regard davantage critique sur l'éventuelle transition vers les carburants de 2^{ième} génération, de plus en plus réclamée pour pallier aux impacts de la 1^{ère} génération de carburants végétaux.

Pour ce faire, un des premiers objectifs de notre recherche est d'évaluer la viabilité de l'option de l'éthanol-maïs en Amérique du Nord, en tant que cas exemplaire des carburants végétaux de 1^{ère} génération et en tant qu'alternative partielle à l'essence. Nous évaluerons ensuite la viabilité potentielle de l'éthanol-maïs cellulosique, produit à partir des résidus de la culture du maïs, en tant que cas exemplaire de la 2^{ième} génération de carburants végétaux. Il s'agit en effet du cas le plus susceptible d'être rapidement mis en œuvre à l'échelle commerciale. Ce mémoire tentera donc de cerner l'ensemble des enjeux relevant de la production et de l'usage d'éthanol de 1^{ère} et de 2^{ième} génération, en regard notamment des leurs des impacts environnementaux et sociaux observables et potentiels. En ce sens, les constats tirés de la mise en œuvre controversée des carburants de 1^{ère} génération, à travers le cas du maïs, servent de cadre de référence permettant d'évaluer les risques de la mise en œuvre future de l'option cellulosique.

Pour voir comment s'articule la problématique actuelle des carburants végétaux, nous nous appuyerons principalement sur l'examen de la littérature scientifique. Cette littérature correspond aux discours écrits des experts sur la question des carburants végétaux. Nous croyons, comme l'indique Fourrez (1994), que tout discours, qu'il soit scientifique ou autre, est éminemment

idéologique et que tout sujet connaissant appartient à un ou plusieurs groupes sociaux, dont les membres partagent projets, histoires, représentations du monde, etc. (Fourez, Englebert-Lecomte et Mathy, 1997). Ces groupes partagent ainsi des intérêts et des contingences qui influencent leurs connaissances et leur rapport à la connaissance. Parce que c'est généralement l'avis de l'expert scientifique que l'on sollicite le plus lorsque vient le temps de justifier et de légitimer la prise de décision, la littérature scientifique devient alors une source première d'information qui permet de bien saisir les tenants et les aboutissants de la problématique des carburants végétaux. Souvent contradictoires, les informations qui ressortent de cette littérature permettent de mettre alors en évidence toute la complexité de la problématique.

La structure du document

Notre mémoire comporte quatre chapitres. Le premier chapitre présente la problématique mondiale des carburants végétaux et plus spécifiquement en Amérique du Nord. Nous y présentons brièvement les principales « carburocultures ». Nous y dépeignons la situation mondiale des carburants végétaux, principalement dans le contexte de l'augmentation des besoins énergétiques. En outre, nous présentons le contexte spécifique de l'éthanol-maïs en Amérique du Nord, tant aux États-Unis qu'au Canada. Nous abordons la représentation générale des carburants végétaux en tant qu'énergie propre, verte et renouvelable. Le rôle joué par les scientifiques y sera également discuté. Les orientations méthodologiques sont présentées au chapitre 2.

Le chapitre 3 est consacré à l'analyse de la production d'éthanol à partir du maïs-grain. Nous y comparons les nombreuses études portant sur la viabilité de ce carburant en mettant en dialogue leurs principales conclusions. Nous abordons ainsi les principaux indicateurs de mesures utilisés dans la littérature scientifique (émissions de GES, valeur énergétique, caractère renouvelable). Nous présentons également les conséquences de sa production sur l'environnement et sur la société. Les impacts de sa production sur les sols, l'eau, la biodiversité, la santé humaine, la sécurité énergétique, le développement économique et la sécurité alimentaire sont ainsi développés. En prenant en compte l'ensemble des effets de la production de l'éthanol-maïs, à partir du champ jusqu'au pot d'échappement, sur l'environnement et la société, nous visons à évaluer dans quelle mesure cette énergie peut réellement être considérée comme une alternative viable et partielle aux carburants fossiles.

Le chapitre 4 est consacré à la production d'éthanol à partir de la paille de maïs, en tant que cas exemplaire des conséquences du déploiement de la filière cellulosique (carburants végétaux de 2^{ème} génération). Nous montrons dans quelle perspective se développe cette filière, tout particulièrement dans l'espoir d'augmenter de manière significative la production mondiale d'éthanol, sans mettre en péril la sécurité alimentaire. À l'instar du cas de l'éthanol-maïs, nous présentons les conséquences socio-environnementales de la production d'éthanol-maïs cellulosique. Ce chapitre permet de voir dans quelle mesure les carburants végétaux de 2^{ème} génération peuvent être à leur tour considérés, ou non, en tant qu'alternative énergétique viable et, du moins en partie, aux carburants fossiles. Très peu d'études portent à ce jour sur la question.

CHAPITRE I

LA PROBLÉMATIQUE DES CARBURANTS VÉGÉTAUX

Dans l'état actuel des choses, où la crise du pétrole côtoie celles des changements climatiques et de la biodiversité, la réduction de l'usage des carburants fossiles constitue un enjeu majeur. Certes, sur la scène nationale et internationale, le pétrole joue encore un rôle économique et politique de premier plan. Cependant, la production de carburants tirés du monde végétal, appelés également carburocultures¹, constitue désormais, dans l'univers énergétique, une nouvelle filière de production, annonçant peut-être un changement de paradigme.

Comment expliquer cet intérêt pour les carburocultures? L'anticipation de la fin des réserves mondiales de pétrole, l'instabilité géopolitique des régions productrices et l'accroissement de la demande énergétique mondiale, notamment pour les transports, ajoutés au désir de certains États d'accroître leur indépendance et leur sécurité énergétique, ainsi que leur performance environnementale, contribuent sans doute à expliquer cet engouement.

C'est dans ce contexte que certains prétendent que le secteur agricole aurait le potentiel de fournir une telle alternative sous la forme de carburants végétaux issus du maïs, de la canne à sucre, du soya, des résidus agricoles, etc. (Bush, 2007a; De La Torre Ugarte, English et Jensen, 2007; EAA, 2005; Farrell *et al.*, 2006; Greene et Mugica, 2005; Johnson *et al.*, 2007; Kerr et Service, 2005; McLaughlin *et al.*, 2002; Sanderson, 2006; Shapouri, Duffield et Graboski, 1995; Shapouri, Duffield et Wang, 2002; USDOE, 2006; USSenate, 2007; Wirth, Gray et Podesta, 2003). Les technologies permettant d'utiliser la biomasse cellulosique progressent rapidement bien que ces développements soient insuffisants pour supporter une production commerciale significative. Ces

¹ « Carburocultures » est un néologisme de « biocarburants » emprunté à Francœur (2007a).

facteurs contribuent à promouvoir l'option éthanol en tant qu'alternative à « l'or noir », au point de la présenter, non sans crainte, comme un nouvel « or vert ».

Ce premier volet de la problématique vise à brosser l'état de la situation des carburants végétaux, communément appelés biocarburants, ou encore agrocarburants comme nous le verrons plus loin. Nous nous pencherons plus particulièrement sur le cas exemplaire de l'éthanol-maïs. La production d'éthanol aux ÉU, les premiers producteurs mondiaux d'éthanol destiné aux transports, et celle nettement plus modeste au Canada, s'appuie en très grande partie sur la culture du maïs. L'éthanol en provenance des ÉU représente près de la moitié de l'ensemble de l'éthanol produit dans le monde. Jusqu'à tout récemment encore, l'éthanol-maïs était présenté comme un des éléments clés de la stratégie énergétique et de la lutte aux changements climatiques aux ÉU. De nombreux programmes ont ainsi été mis sur pied pour soutenir le développement de cette filière énergétique. Le cas de l'éthanol-maïs représente en outre, dans le contexte nord-américain, l'essentiel de la production d'éthanol qui connaît, là comme ailleurs, une très forte expansion dont les conséquences socio-environnementales s'annoncent déjà fort préoccupantes.

1.1 LES CARBURANTS VÉGÉTAUX EN GÉNÉRAL

Les carburants végétaux destinés essentiellement aux transports connaissent, depuis une quarantaine d'années, un essor marqué, principalement aux ÉU et au Brésil. Depuis les années 1990, de nombreux pays, comme le Canada, ont emboîté le pas et ont commencé à soutenir le développement de cette filière énergétique. Généralement présentés comme une source d'énergie propre, ayant un faible taux d'émissions de gaz à effet de serre (GES), les carburants végétaux, que l'on dit renouvelables par nature, pourraient, dit-on, être produits par la majorité des pays et des régions, tout en permettant aux agriculteurs de diversifier leurs revenus. Jusqu'au tournant des années 2000, la majorité des partisans de l'éthanol parmi les politiciens, industriels, agriculteurs et écologistes ont semblé galvanisés par les promesses des carburants végétaux, présentés comme une option viable, au point d'en faire une énergie à privilégier, voire un choix salvateur dans la lutte aux changements climatiques. Or, comme nous le verrons, ce dossier est non seulement beaucoup plus complexe, mais il est surtout nettement plus problématique que l'image superficielle qu'on en a longtemps donnée.

L'intérêt environnemental porté aux biocarburants végétaux, notamment comme outil de réduction des émissions de GES, les enveloppant d'une aura de nouveauté, a largement contribué à cet engouement d'une ampleur inégalée, ce dont témoigne une rapide recension des quotidiens québécois sur la question².

Il convient toutefois de rappeler que cette perception de nouveauté n'est pas parfaitement fondée. Rappelons en effet que les carburants végétaux, intimement liés à l'histoire de l'automobile et du moteur à explosion, faisaient déjà tourner les moteurs au 19^{ème} siècle (Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007). D'ailleurs, dès 1826, Samuel Morey, concepteur de l'un des premiers moteurs à explosion interne, utilisait déjà un carburant résultant d'un mélange d'éthanol et de térébenthine (Jacobson, 2007). En 1908, le Modèle T de Ford roulait soit à l'essence, soit à l'éthanol (Kovarik, 1998). Ajoutons que le principe de fermentation des sucres, permettant de transformer le grain en alcool et conduisant à la production d'alcool comme l'éthanol, est connu depuis plus de 6 000 ans.

Cependant, l'intérêt nouveau porté aux biocarburants végétaux ne date que du milieu des années 1970, au moment où le Brésil et les ÉU ont entrepris leur production à une échelle industrielle et commerciale pour le transport, suite notamment au choc pétrolier de 1973 et de 1979. Cela est assez loin des prétentions vertes d'un recours à une énergie propre. En fait, il semble surtout que ces choix économiques et géopolitiques se sont révélés être, *a posteriori*, des mesures bénéfiques à l'environnement, ce qui a permis d'utiliser pendant un certain temps cet argument. Toutefois, comme nous le verrons dans une section ultérieure, les carburants végétaux sont de plus en plus l'objet de controverses socio-environnementales. Or, pour bien en comprendre le sens et la portée, il faut examiner attentivement l'expression même de *carburants végétaux*.

² Pour l'année 2007 seulement, dans les médias francophones du Québec, comme des quotidiens à grand tirage tels *La Presse*, *Le Soleil*, *Le Droit* et *Le Devoir*, et encore les magazines tels *L'Actualités*, *Les Affaires*, *Protéger-Vous* et *Voir*, plus de 350 articles ressortent aux mots-clés *carburants végétaux*, *agrocultures*, *biocarburants* et *éthanol*.

1.1.1 Les carburants végétaux.

Biocarburants, Agrocarburants, Carburants végétaux?

Pourquoi qualifier de « carburant végétal » ce qui est communément appelé « biocarburant » ou encore « agrocarburant »? Le terme biocarburant s'articule autour du préfixe « bio », qui vient du grec *bios* et qui signifie « la vie ». Il n'est pas ici question d'un carburant vivant, mais bien plutôt d'un carburant issu de la vie, ce qui est également le cas pour le pétrole.

Il semble être généralement compris comme un carburant tiré, à tout le moins en partie, de produits provenant de l'agriculture. Concrètement toutefois, ils sont généralement présentés sous la forme d'un mélange, à différentes concentrations, avec les carburants conventionnels comme l'essence et le diesel.

Comme nous le verrons plus loin, il est possible de produire des carburants à partir du monde végétal, mais également à partir du monde animal. En effet, certains biodiesel sont produits à partir de graisse animale. Cependant, pour l'ensemble de cette filière énergétique, la production de carburants à partir de matériel animal reste très marginale.

Le terme « bio » représente également l'abréviation du terme « biologique », désignant dans le langage courant les produits issus de l'agriculture biologique. Compris en ce sens, il teinte alors l'expression « biocarburant » de « vert », comme s'il s'agissait d'un carburant moins nuisible à l'environnement.

Largement utilisé dans le domaine scientifique, industriel et gouvernemental, ce terme est ainsi souvent associé à celui de carburant écologique, et donc favorable à l'environnement. Les informations récentes sur leurs performances environnementales suggèrent toutefois que ces carburants sont loin d'être aussi inoffensifs que ne le laissent entendre de telles expressions. Certains parlent notamment d'un éthanol qui émettrait davantage de GES qu'un outil permettant de limiter ces émissions (Pimentel, 2003; Pimentel et Patzck, 2005 2007; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007). D'autres soulignent que la production de ce carburant exige plus d'énergie qu'il n'en produit (Patzek *et al.*, 2005; Pimentel, 2001 2003; Pimentel et Patzek. 2005; Pimentel,

Patzek et Cecil, 2007). D'autres montrent que le caractère renouvelable de l'éthanol se limiterait à la possibilité de cultiver à nouveau du maïs dont il est tiré (Dukes, 2003; Patzek, 2006a; Pimentel, 2003; Pimentel *et al.*, 2002; Uihlein, Ehrenberger et Schebek, 2007).

Le terme agrocaburant fait davantage référence à sa provenance, en tant que produit issu de l'agriculture. De plus en plus utilisé par ses détracteurs, il désigne surtout les grandes monocultures intensives de type industriel, couvrant généralement de vastes superficies (voir notamment : Biofuelwatch, 2007; CEO, 2007; Darier, 2007; GRAIN, 2007a, b et c; Holtz-Giménez, 2007). Enfin, si nous préférons, pour notre part, utiliser l'expression « carburants végétaux », c'est que cette expression nous semble être à la fois plus large, plus exacte, moins chargée idéologiquement, bref, plus appropriée. En effet, elle reflète à la fois l'origine végétale de ces carburants qui ne sont pas nécessairement issus de l'agriculture traditionnelle, mais englobent également de nouvelles variétés de plantes ainsi que des produits forestiers.

Les carburants végétaux sont essentiellement produits à partir de la biomasse végétale, résultant surtout de l'agriculture (AIE, 2004; ONU-Énergie, 2007). Rappelons qu'en écologie, la notion de biomasse correspond souvent au poids – exprimé en poids sec – de l'ensemble du vivant dans un espace donné, qu'il s'agisse de biomasse animale ou végétale (Boullard, 1988; Ricklefs, 1996). Cependant, la notion de biomasse, telle qu'utilisée dans le domaine de l'énergie, désigne « la matière végétale susceptible d'être utilisée directement ou par transformation à des fins énergétiques » (Lafrance, 2007, p. 416). Certains auteurs conçoivent cette biomasse comme étant : « *all plant and plant-derived materials including animal manure, not just starch, sugar, oil crops already used for food and energy* » (Perlack *et al.*, 2005, p. i). En ce sens, on pourrait considérer le pétrole comme un carburant issu d'une biomasse végétale du passé. L'énergie fournie par le pétrole pourrait être ainsi considérée comme de l'énergie solaire enfouie et emmagasinée par des plantes et des microorganismes d'une autre époque (Dukes, 2003).

L'idée de produire de l'énergie à partir de la biomasse est assez commune. Ainsi, on brûle couramment de la biomasse pour produire, à partir du bois, de la chaleur, de la vapeur ou de l'électricité, types d'usages toutefois de plus en plus décriés à cause de leurs fortes émissions polluantes. Cependant, dans le cas d'une énergie dédiée aux transports, on parlera plutôt d'une biomasse qui, par sa combustion thermo-chimique directe ou indirecte, pourra être transformée en carburant suite à un processus de fermentation, comme c'est le cas avec les carburants végétaux.

Deux générations de carburants végétaux

On peut également distinguer les carburants végétaux en fonction de leur origine. Ils peuvent être produits à partir du grain des céréales (maïs, blé) et de cultures sucrières traditionnelles (canne à sucre, betterave à sucre). Ils peuvent aussi être produits à partir d'oléagineux (e.g. le soya) et de cellulose. Dans la littérature, le terme biomasse est utilisé pour parler de la matière végétale qui n'est pas associée à une fonction, et il désigne alors principalement les cultures non alimentaires. Ainsi, il y aurait d'un côté l'éthanol-maïs par exemple, produit à partir du maïs-grain, et, de l'autre, l'éthanol de biomasse qui serait produit à partir de résidus agricoles des cultures du maïs comme la paille de maïs³. Cela présuppose qu'on associe ces résidus à des déchets, alors que, comme nous le verrons au chapitre 4, ces résidus jouent un rôle clé dans la protection et la régénération des sols. L'éthanol de biomasse peut également être produit à partir de cultures pérennes – telles que le panic érigé (*Panicum virgatum* L.) et l'herbe à éléphant (*Miscanthus x giganteus*) – et à partir de la biomasse forestière, ce qui pose une fois de plus la question de l'importance de préserver certains résidus pour la protection et la régénération des sols.

Dans ce cas, on distinguera alors les carburants végétaux de *première génération*, à savoir l'éthanol issu du maïs et de la canne à sucre, de ceux de *seconde génération*, parmi lesquels on retrouve l'éthanol cellulosique tiré à partir des résidus agricoles comme la paille de maïs. Les carburants végétaux de 2^{ème} génération, issus d'une biomasse végétale n'interférant pas directement, dit-on, avec la production alimentaire se distingueraient ainsi de ceux de 1^{ère} génération issus de l'agriculture. Là où on utilisait simplement des sucres (sucrose, amidon) disponibles dans les plantes – les carburants végétaux de 1^{ère} génération –, on cherche maintenant à avoir accès aux différents sucres difficilement accessibles, tels que la cellulose et l'hémicellulose – les carburants végétaux de 2^{ème} génération.

Les carburants végétaux : une énergie renouvelable?

On dit généralement des carburants végétaux qu'ils constituent une forme d'énergie renouvelable. Le Programme des Nations Unies pour l'environnement les classe ainsi (PNUE, 2007a), alors que

³ Il s'agit de la tige et des feuilles du plant de maïs laissées au champ après la récolte du grain. En anglais, on utilise l'expression de *corn stover*.

des documents officiels du gouvernement du Canada évoquent le caractère *renouvelable* des carburants végétaux dans la mesure où ils sont le produit de ressources renouvelables (voir notamment : Canada, 2004, 2006b, 2007f; Forge, 2007). Les plantes cultivées étant récoltées puis transformées ainsi d'une année à l'autre, l'énergie fournie par les carburants végétaux est alors considérée comme le produit d'une énergie solaire emmagasinée par photosynthèse dans les plantes puis convertie en carburant par fermentation. Toutefois, dans la mesure où leur production nécessite de grands volumes de ressources associées à une agriculture intensive (eau, énergies fossiles, intrants, pesticides, etc.), en plus d'entraîner la surexploitation et l'appauvrissement des sols, un tel mode de production agricole peut difficilement être considéré à long terme comme renouvelable.

1.1.2 Les principales carburocultures : biodiesel et éthanol

Il existe deux grandes catégories de carburants végétaux⁴ : les esters méthyliques d'huiles végétales – ou biodiesel –, dans les moteurs de type diesel, et l'éthanol dans les moteurs de type essence. Fait remarquable, ils sont tous deux produits à partir de procédés assez simples, connus depuis très longtemps. Le biodiesel peut être obtenu par pressage et par raffinage, un procédé semblable à celui qui est utilisé pour obtenir les huiles végétales destinées à l'alimentation. Les différents types de biodiesel proviennent principalement d'huiles extraites de variétés végétales oléagineuses, tels le colza (*Brassica napus* L.), le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) et le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq.), qui peuvent par la suite être converties en esters méthyliques. Les biodiesels peuvent aussi être issus du recyclage d'une vaste gamme de graisses animales. La production de biodiesel fait toutefois l'objet de vives critiques, notamment le biodiesel produit à partir de l'huile de palme.

La culture intensive de palmiers à huile entraîne en effet de grands bouleversements écologiques (Augustyn, 2007; Fargione *et al.*, 2008; Greenpeace, 2007; Monbiot, 2006; Pearce, 2005). Ainsi, un rapport conjoint du Programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE) et de l'UNESCO (Nellemann *et al.*, 2007) fait état de l'abattage massif des forêts primaires en Indonésie et de ses conséquences sur la biodiversité.

Le cas spécifique de l'éthanol

L'éthanol, un alcool, produit de la fermentation des sucres, peut être produit simplement à partir de matériel végétal contenant de fortes concentrations de sucre, comme la canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) et la betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.). L'éthanol peut aussi être produit à partir de l'amidon – que l'on retrouve abondamment dans le maïs (*Zea mays* L.) ou encore dans le blé (*Triticum sp.*).

Ces sources d'éthanol correspondent à la catégorie des carburants végétaux de 1^{ère} génération. Ces cultures énergétiques⁵ sont également des cultures alimentaires. Comme nous l'avons souligné précédemment, il est aussi possible d'en produire à l'aide de matériel cellulosique divers. De nombreuses études tentent actuellement de légitimer la culture de certaines variétés végétales, telles que des graminées fourragères comme le *Panicum virgatum* L. (McLaughlin et Walsh, 1998; Varvel *et al.*, 2008) et le *Miscanthus x giganteus* (Heaton *et al.*, 2004; Lewandowska *et al.*, 2000). D'autres soulignent l'intérêt du maïs tropical (Bant, 2007), du peuplier (*Populus sp.*) et du saule (*Salix sp.*) (Kintisch, 2007; Schneider et McCarl, 2003; Smaliukas, Noreika et Karalius, 2007; Yemshanov et McKenney, 2008). D'autres encore proposent de produire de l'éthanol cellulosique à partir de la récupération de divers résidus agricoles et forestiers (Hoskinson *et al.*, 2007; Kim et Dale, 2004; 2005b; Koonin, 2006; Lavigne et Powers, 2007; Service, 2007; Sokhansanj *et al.*, 2002; Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007; Tomey *et al.*, 2007; Varvel *et al.*, 2008; Wald, 2007; Wyman, 2007). Le gouvernement du Québec a dernièrement choisi de favoriser cette option, en investissant près de 25 millions de dollars dans la création d'une chaire de recherche à l'Université de Sherbrooke sur la valorisation des résidus forestiers (Québec, 2007), une option cellulosique, comme nous le verrons plus loin, qui est également l'objet de critiques.

⁴ Nous ne nous arrêtons pas, dans ce mémoire, au processus de fabrication et aux techniques de production des carburants végétaux, considérant qu'il ne s'agit ni du lieu pour le faire, ni surtout de notre objet d'étude.

⁵ Traduction libre de l'expression anglaise *energy crops*, expression qui se justifie pour parler de cultures, non plus alimentaires, mais dont les fruits (le grain) ou les autres parties aériennes des plantes (pour la cellulose qu'elles contiennent) sont plutôt destinés à la production de carburants destinés aux transports.

Ce sont toutefois essentiellement les cultures alimentaires de maïs et de canne à sucre qui servent actuellement à fabriquer de l'éthanol. Ainsi, aux É-U et au Brésil, l'éthanol est produit presque entièrement à partir du maïs-grain et de la canne à sucre, qui, compte pour environ 85% de la production mondiale d'éthanol destiné au transport (RFA, 2009b). Les végétaux renferment, certes, une très grande quantité de sucres sous forme de cellulose et d'hémicellulose, mais ils présentent un désavantage certain sur l'amidon du grain et le glucose de la canne à sucre, dans la mesure où il est très complexe de convertir ces composés en éthanol. La structure complexe des membranes cellulaires des végétaux où se retrouvent ces sucres fait en sorte que la conversion de ces substrats dans les raffineries d'éthanol cellulosique est trop complexe, coûteuse et énergivore pour pouvoir être commercialisée à grande échelle (USDOE, 2006)⁶, ce qui explique que la production d'éthanol cellulosique soit encore relativement marginale.

Au Canada, on mélange généralement l'éthanol à l'essence pour l'utiliser comme additif à l'essence, dans des pourcentages allant de 5 à 25%, en remplacement du méthylcyclopentadiényl manganèse tricarbonyle (MMT) utilisé depuis 1976 en remplacement du plomb et de l'éther méthylique ter-butylique (MTBE) (Canada, 1999 et 2003b). Au-delà de ces concentrations toutefois, les moteurs doivent subir une modification pour être en mesure de supporter la corrosion par l'alcool (Borde, 2005; Canada, 2004; Forge, 2007; PNUE, 2007a). On l'utilise aussi dans différentes concentrations allant jusqu'à sa forme pure (E100). On nommera par exemple E10 et E85 des mélanges à concentration de 10% et de 85% d'éthanol à l'essence⁷. Les mélanges E10 et moins sont actuellement les plus répandus dans le monde (Forge, 2007).

1.2 QUELQUES DONNEES RELATIVES AUX CARBURANTS VEGETAUX

1.2.1 Les carburants végétaux dans le monde

Comme nous l'avons déjà vu, l'idée des carburants végétaux date du 19^{ème} siècle et depuis les années 1970, au Brésil et ensuite aux États-Unis, ces productions ont connu une forte hausse. En

⁶ Le procédé actuel de conversion de la biomasse cellulosique en éthanol tirerait ses origines dans l'Allemagne d'avant-guerre, durant les années 1930, dans les balbutiements de l'industrie de la chimie du bois (Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007; USDOE, 2006).

1975, le Brésil, en réaction aux difficultés économiques provoquées par le premier choc pétrolier de 1973, lançait le programme pro-alcool, entreprenant de stimuler une économie précaire en misant sur la culture locale de la canne à sucre et sa possible transformation en éthanol (Borde, 2005; de Oliveira, 1991; Lafrance, 2007; Marris, 2006; Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007). Au Brésil⁸, la consommation d'éthanol occupe actuellement environ 40% de tous les carburants destinés aux transports (WI, 2006). De leur côté, les ÉU choisirent au tournant des années 1980 la voie de l'éthanol-maïs à des fins, dit-on, de sécurité énergétique. Suite aux deux chocs pétroliers (1973 et 1979) et suite à l'atteinte du pic de sa production de pétrole, les ÉU se tournèrent à la fois vers le pétrole étranger et le soutient à une industrie d'éthanol-maïs (Borde, 2005; Canada, 2007; Marris, 2006; Youngquist, 1999). À l'aide d'exemptions de taxes à la consommation et de subsides à la production, ils ont ainsi ravivé un secteur qui, présent dès le début du 20^{ième} siècle n'avait pu se développer compte tenu de la suprématie des compagnies de pétrole (Kovarik, 1998).

Par leurs importantes politiques de support à leur filière domestique respective – éthanol de canne à sucre au Brésil et de maïs aux ÉU – , ces nations sont devenues les deux plus grands producteurs mondiaux de carburants végétaux. L'ensemble de leur production d'éthanol correspond à près de 90% de la production mondiale, estimée à plus de 65 milliards de litres (RFA, 2009b). Il convient toutefois de souligner que cette production ne correspond qu'à 1% de l'ensemble des carburants liquides destinés aux transports dans le monde (RFA, 2007; WI, 2006b).

Les ÉU sont le premier producteur, avec une production de 34 milliards de litres en 2008 (RFA, 2009b). Malgré d'importantes mesures de support à la production, l'éthanol des ÉU ne représenterait que 1% (Pimentel et Patzck, 2006) à 2% (AIE, 2004; RFA, 2005; WI, 2006) de sa consommation nationale de carburant liquide pour le transport. Quant au Brésil, sa production a atteint les 24,5 milliards de litres en 2008 (RFA, 2009b). En 2004, l'éthanol de canne consommé au Brésil représenterait près de 40% de sa consommation nationale d'essence et 15% de l'ensemble de sa consommation de carburant liquide destiné au transport (Prieur-Vernat et His, 2007). Depuis le tournant du millénaire, on estime que la production mondiale d'éthanol a plus

⁷ En ce qui a trait au biodiesel, on retrouve surtout sur le marché le BD20, pour des mélanges à 20% de biodiesel au diesel conventionnel.

⁸ Les mesures mises en place au Brésil font en sorte que l'essence conventionnelle contienne entre 22 et 26% d'éthanol.

que doublé (fig. 1.1). Elle serait passée de 20 milliards de litres à quelque 65 milliards actuellement (RFA, 2007, 2009b; WI, 2006) et certaines instances estiment qu'elle augmentera davantage encore d'ici la fin de la décennie (ONU-Énergie, 2007).

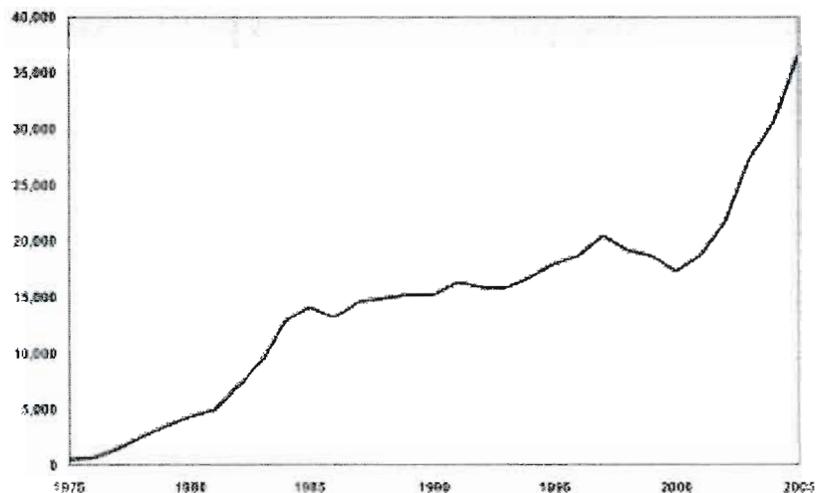


Figure 1.1 L'évolution de la production mondiale d'éthanol, en millions de litres, entre 1975 et 2005

d'après Worldwatch Institut (WI, 2006)

L'éthanol est actuellement le carburant végétal destiné aux transports dont la production et l'usage sont les plus élevés dans le monde⁹. Selon les scénarios de l'Agence internationale de

⁹ La production de biodiesel est plus faible. La production de biodiesel est toutefois plus importante en Europe qu'ailleurs, où elle dépasse la production d'éthanol local. Son volume total de production est toutefois relativement petit en comparaison avec ceux d'éthanol états-uniens et brésiliens (pour des données brutes relevant de la production d'éthanol et de biodiesel dans le monde et selon ses régions, ainsi que pour certaines informations relatives à la part de biodiesel contenu dans les carburants européens, voir pp. 28-29 du document de l'AIE (2004)). L'Union Européenne, et en particulier l'Allemagne, domine actuellement la production mondiale ainsi que la consommation mondiale (WI, 2006). C'est ainsi que 3,5 milliards de litres qui étaient produits par l'UE en 2005, à 80% à partir de la culture du colza, correspondant toutefois à moins de 2% de la consommation européenne de diesel (Forge, 2007). Selon le même document, la production états-unienne était plus de 10 fois moindre – 288 millions de litres en 2005 équivalent à moins de 0,2% de la consommation nationale de diesel – tandis que celle du Canada était à peu près nulle avec une seule grande usine de transformation située à Sudbury (Ontario). La production de biodiesel canadien prend à la fois la route des ÉU, à la fois il est destiné à certaines flottes de véhicules au Canada, notamment celle de la Société de transport de Montréal (Forge, 2007; LaFrance, 2007). L'idée du biodiesel est tout autre que celle de l'émancipation étatique au pétrole avancée à travers la production de l'éthanol; il s'agirait plutôt historiquement d'une émancipation de l'individu par la récupération et la revalorisation d'huiles végétales et de graisses animales recyclées. Ce carburant végétal de « patates frites » comme on pourrait communément

l'énergie (AIE), l'utilisation totale de carburants végétaux devrait représenter de 4 à 7% de tous les carburants routiers en 2030 (AIE, 2006). Toutefois, l'impact de ces carburants dépendra largement de l'efficacité énergétique du parc automobile. De nombreux pays ont mis en œuvre des politiques favorisant le secteur des carburants végétaux ces dernières années. Parmi eux, notons : l'Argentine, l'Australie, la Chine, la Colombie, l'Équateur, l'Inde, l'Indonésie, le Malawi, la Malaisie, le Mexique, le Mozambique, les Philippines, le Sénégal, l'Afrique du Sud, la Thaïlande et la Zambie, sans oublier le Canada (Canada, 2007b et 2007e), les ÉU (Bush, 2007a; USSenate, 2007) et l'Union Européenne (UE, 2003).

1.2.2 L'augmentation des besoins énergétiques

Bien avant la question des changements climatiques, l'anticipation des besoins énergétiques futurs et le désir d'accroître la sécurité et l'indépendance énergétiques nationales constituent les forces majeures de transition vers les carburants végétaux. Les différents scénarios des besoins énergétiques annoncent que notre consommation en énergie devrait être sans cesse grandissante. C'est le cas notamment du pétrole dans le secteur des transports bien que, selon les experts, l'ère du pétrole tire à sa fin, comme le confirment de nombreuses études. Soulignons notamment les études traitant des capacités mondiales de production de pétrole, portant sur l'atteinte du pic pétrolier et sur le dépassement des capacités mondiales de production, dont, entre autres, les études de l'AIE (2004, 2006, 2007)¹⁰, du U.S. Geological Survey (USGS, 2008) et les bases de données de la *British Petroleum* (BP, 2007), celles de l'*Energy Watch Group*¹¹ (EWG, 2007) et celles de l'Association pour l'étude du pic de pétrole et de gaz naturel (ASPO, 2007), sans oublier celles du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE, 2007b)¹² ainsi que

l'appeler, n'est en fait que la remise au goût du jour des possibilités et du sens initial du moteur diesel par des producteurs maisons, sous la forme que son inventeur, Rudolf Diesel, l'avait rêvé : un moteur tout simplement multi-carburant (Conz, 2006). Sa production s'est réellement mise en place durant les années 1990.

¹⁰ L'AIE est un organisme proche de l'industrie voguant dans le secteur de l'énergie.

¹¹ L'EWG et l'ASPO sont des organismes indépendants observant le développement des questions mondiales sur l'énergie, notamment sur le cas du pétrole.

¹² Le PNUE, organe de l'ONU, a produit en 2007 son quatrième rapport *Global environment outlook* (GOE4) où il s'arrête aux questions d'énergie, notamment au chapitre premier.

l'ouvrage de l'ingénieur québécois Gaétan Lafrance intitulé *La vie après le pétrole* (Lafrance, 2007)¹³.

Le pétrole, ressource incontournable dans le fonctionnement et le développement des sociétés actuelles, modèle profondément l'économie et la géopolitique mondiale. Les sociétés industrialisées ont largement épuisé, en moins de 2 siècles, cette abondante ressource. Par conséquent, tout annonce qu'il faudra vivre avec beaucoup moins, voire même sans pétrole dans un futur rapproché. Selon l'AIE (2004), les besoins en énergies fossiles devraient tripler d'ici quelques décennies afin de répondre aux besoins grandissants des sociétés occidentales et des grands pays en émergence, comme la Chine et l'Inde, où se concentre près du tiers de la population mondiale.

Par trois fois au cours des dernières décennies, les économies des pays occidentaux, si profondément dépendantes du pétrole, ont été particulièrement affectées par des crises liées à une augmentation sévère des prix du pétrole – au milieu des années 1970, au début de la décennie 1980 et actuellement (ONU-Énergie, 2007). Leurs activités étant inextricablement liées au pétrole tant dans le secteur de l'énergie, du transport, de la pétrochimie (e.g. intrants chimiques en agriculture), et des matériaux (e.g. plastiques et polymères divers), (voir notamment Youngquist, 1999), toute hausse du prix du pétrole a de profonds effets de déstabilisation sur ces économies. Mais cela est beaucoup plus grave encore pour les pays en développement, dont certains vont dépenser jusqu'à six fois plus pour leurs besoins en carburant que pour leur système de santé (ONU-Énergie, 2007).

Nombre de spécialistes considèrent que, malgré certaines fluctuations à la baisse, les coûts du pétrole devraient rester élevés à long terme (Runge et Senauer, 2007). Les demandes de pétrole devraient augmenter, au fur et à mesure que ses disponibilités diminueront. On prévoit que les réserves restantes, celles qui demeurent à découvrir, seront situées dans des zones soit de plus en plus éloignées, soit plus instables politiquement, rendant difficile leur exploitation. Certains organismes, tels l'EWG (2007) et l'ASPO (2007), s'appuyant sur la diminution du nombre de mises en exploitation de nouveaux gisements au cours des dernières années, affirment que les réserves diminuent. Si ces prévisions se confirment, nous n'en aurons alors plus pour longtemps à

¹³ Voir aussi à ce sujet Richard Gilbert et Anthony Perl. *Transport revolutions . moving people and*

pouvoir pomper le pétrole du sous-sol de la planète. L'ASPO (2007) estime qu'il ne reste que 854 milliards de barils disponibles et que les réserves seront pratiquement épuisées en 2030. Des études plus optimistes, réalisées par l'industrie, estiment qu'il en resterait plutôt 1208,2 milliards (BP, 2007), dont notamment environ 90 milliards seraient renfermés dans les profondeurs de l'Arctique (Bird *et al.*, 2008). Selon ce scénario *business-as-usual*, la production de pétrole, loin d'avoir atteint à ce jour son pic, devrait continuer à croître jusqu'en 2030. Au-delà de 2030, ces études restent muettes. Quoi qu'il en soit, un imposant virage énergétique doit se faire d'ici 20 ans et d'ici là nous ne pourrions sans doute plus faire usage du pétrole tel qu'on le fait présentement.

Un contexte favorable au déploiement de la filière des carburants végétaux

La question des carburants végétaux est évidemment inextricablement liée à la perspective de la fin du pétrole. Les différents scénarios prévoient un accroissement continu de la consommation mondiale en énergie liquide, une demande qui est actuellement satisfaite par le pétrole. D'un côté, en s'industrialisant et en s'appropriant un mode de vie à l'occidental, les pays en développement augmentent leur consommation d'énergie. De l'autre, les pays industrialisés, très énergivores, mais à des degrés variables, les plus énergivores *per capita* étant le Canada et les ÉU (AIE, 2007), cherchent à maintenir leur croissance économique et à préserver leur standard de vie. À cela, s'ajoute la perspective de l'accroissement anticipé de la population mondiale. Selon ces mêmes études, l'anticipation de la baisse des réserves mondiales de pétrole et l'accroissement subséquent de son prix nous forcent à trouver des alternatives. Les carburants végétaux, considérés comme énergie renouvelable pouvant être produite de manière domestique, semblent alors tout indiqués pour remplir ce rôle. Selon Runge et Senauer (Runge et Senauer, 2007), la consommation mondiale d'énergie fossile augmentera de 71% entre 2003 et 2030. Le rapport de l'AIE (2007) soutient toutefois que les réserves mondiales de pétrole restantes seront suffisantes pour supporter l'augmentation anticipée de la consommation jusqu'en 2030. L'AIE avance que 74% de cette augmentation sera due à l'industrialisation des pays en développement. La Chine et l'Inde, à elles seules, seront responsables d'environ 50% de cette hausse totale. Un autre 20% proviendrait des pays développés. L'*Energy Information Administration* prévoit une croissance de la demande en énergie de 16% pour le secteur du transport de passagers et de marchandises d'ici 2030 (EIA, 2008). L'augmentation de la pression par les pays en développement sur les réserves encore

existantes est aussi prévue par le gouvernement des ÉU (USDOE, 2006). Cette situation créera de toute évidence une pression accrue pour les produits pétroliers, augmentant leurs prix, ce qui pourrait alors fournir un contexte favorable pour le développement de la filière des carburants végétaux (Runge et Senauer, 2007).

1.3 LES CARBURANTS VÉGÉTAUX D'AMÉRIQUE DU NORD. LE CAS EXEMPLAIRE DE L'ÉTHANOL-MAÏS

Le cas de l'éthanol produit à partir du maïs nous intéressera tout particulièrement pour la suite de ce mémoire. Il a l'avantage de toucher, à lui seul, à l'ensemble des grands problèmes et aux grandes controverses reliées aux carburants végétaux¹⁴. La filière de l'éthanol-maïs nous intéresse particulièrement parce qu'elle est la production de carburants végétaux la plus importante en Amérique du Nord. Elle dérive d'une ressource qui fut autrefois la base alimentaire des premiers habitants de notre continent – du Mexique aux basses terres du Saint-Laurent. Devenant maintenant la « base alimentaire » d'une partie de notre flotte de véhicules, la production de l'éthanol-maïs et la controverse entourant son usage nous semblent un bon exemple des représentations souvent contradictoires de questions environnementales et un bon exemple également des politiques publiques inconsistantes et à courte vue posant parfois plus de problèmes que ceux qu'on cherche à résoudre.

Comme nous l'avons déjà souligné, l'Amérique du Nord est actuellement un des plus gros producteurs mondiaux de carburants végétaux et cette production repose essentiellement sur l'éthanol-maïs à partir de maïs-grain. Alors que les ÉU produisaient près de la moitié de l'éthanol mondial en 2008, le Canada n'en produisait qu'environ 1,5% (près de 900 millions de litres sur une production mondiale de 65 milliards de litres) (RFA, 2009b), principalement issu du maïs (RFA, 2007). Le Canada est donc un petit joueur sur la scène mondiale des carburants végétaux.

¹⁴ Notons toutefois que la filière des biodiesels n'est pas très développée aux ÉU et au Canada, la production de biodiesel y reste plutôt marginale. Quelques programmes ont été mis en place : notamment, le projet BIOBUS (2003), un projet pilote d'utilisation de biodiesel au niveau de la flotte d'autobus de la Société de transport de Montréal, et le projet BioMer (2005), une flotte de bateaux de croisières récréotouristiques fonctionnant au biodiesel au niveau du Vieux-Port de Montréal. On peut aisément retrouver ces documents sur le site du Conseil québécois du biodiesel (CQB, 2007).

Depuis le tournant du siècle, la culture du maïs nord-américain représente l'équivalent de 40% du maïs produit et récolté dans le monde entier (Canada, 2008e; Kim et Dale, 2004; Patzek *et al.*, 2005) et c'est en Amérique du Nord que les rendements agricoles des grandes monocultures de maïs sont les plus élevés (Kim et Dale, 2004). En 2000, 83 % de la production totale de maïs entrait alors dans la chaîne agroalimentaire : 64% pour le bétail et 19% directement destinés à l'alimentation humaine.

En ce sens, l'augmentation de la part de la production de grains destinée à la filière de l'éthanol ne risque-t-elle pas de se faire constamment au détriment du secteur alimentaire? Par ailleurs, l'augmentation de la production d'une culture aussi exigeante que celle du maïs, ne risque-t-elle pas d'exacerber les problèmes environnementaux liés à l'agriculture (e.g. baisse de fertilité des sols, pollution des cours d'eau, eutrophisation, etc.)?

1.3.1 Le contexte états-unien

Les ÉU sont les plus grands consommateurs de pétrole, notamment à cause de la soif de son volumineux parc automobile constitué de véhicules particulièrement énergivores : ses citoyens sont friands de véhicules à forte consommation et sa flotte est la plus importante au monde (pour l'instant du moins en attendant la Chine et l'Inde). En 2006, il s'est consommé, aux ÉU seulement, le quart de la consommation mondiale de pétrole (USDOE, 2006), alors que les ÉU ne possèdent que 3% des réserves mondiales restantes, alors que 60% des autres réserves mondiales se retrouveraient dans des zones de la planète considérées par les ÉU comme « sensibles » et « volatiles », telles que le Moyen-Orient et le Venezuela. Cette dépendance aux importations de pétrole étranger est un facteur déterminant de la sécurité énergétique du pays et de la géopolitique américaine. Assurer une meilleure sécurité énergétique devient alors un argument important pour justifier la production de carburants alternatifs.

Comme nous l'avons vu, les ÉU ont emprunté la voie des carburants végétaux au tournant des années 1980, en s'appuyant sur des études montrant que l'éthanol constituait un additif à l'essence moins polluant que le MTBE (Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007). Ces études suggéraient aussi de plus faibles taux d'émissions de gaz carbonique par des carburants à base d'éthanol comparativement à l'essence. Facile à cultiver à grande échelle, le maïs est une

ressource riche en sucre (sous forme d'amidon). Il s'agit aussi d'une culture déjà fortement implantée aux ÉU. En 2007-2008, la production de maïs aux ÉU était estimée à 74,9 millions de tonnes métriques, représentant alors l'équivalent de 40% de la production mondiale (sur une production mondiale de 775,3 millions de tonnes métriques) (Canada, 2008e). Miser sur le maïs pour la production d'un carburant domestique, en plus de contribuer à la sécurité énergétique, était aussi une manière de soutenir l'un des plus importants secteurs agricoles au pays. Depuis le début de leur production d'éthanol-maïs, celle-ci est passée de quelques millions de litres, au début des années 1980, à 6,5 milliards au tournant du millénaire, puis à 16 milliards en 2005, avant d'atteindre les niveaux de 2007 de 24.6 milliards et actuels de 34 milliards en 2008 (RFA, 2007, 2009b; Shapouri, Duffield et Wang, 2002; WI, 2006). On comptait aux ÉU quelque 139 usines, dans 21 États, de transformation qui convertissent environ 19% (Leibtag, 2008) de la récolte nationale de maïs de 2007 en éthanol. En janvier 2008, on pouvait en compter plus de 170 (RFA, 2009a). Rappelons que ce pays est le plus gros producteur de maïs assurant 40% de la production mondiale (Kim et Dale, 2004). La part du maïs produit aux ÉU et transformé en éthanol correspond à environ 25% de sa récolte nationale de maïs et environ 10% de la récolte mondiale (Canada, 2008e).

Comme on l'a déjà mentionné, l'éthanol ne correspondrait qu'à 1% ou 2% de la consommation nationale d'essence destinée aux transports (Pimentel et Patzek, 2006). Le dernier *State of the Union* (Bush, 2007b) annonçait l'augmentation de la part d'éthanol dans l'essence pour 2017 à 15%, cherchant par le fait même à diminuer de 20% l'usage du pétrole au profit notamment d'une production de 132 milliards de litres d'éthanol. L'objectif du USDOE (2006) est de remplacer 30% de l'ensemble de la consommation nationale d'énergies fossiles par des carburants végétaux domestiques. L'objectif du dernier *U.S. Energy Bill* est de produire 136 milliards de litres de carburants renouvelables d'ici 2022, dont environ 57 milliards devraient être produits à partir du maïs-grain (USSenate, 2007). Comme les ÉU consomment, pour les transports, environ 530 milliards de litres de carburants par année, et que cette demande en carburant devrait continuer à croître, il faudrait donc, pour atteindre l'objectif du USDOE, produire 226,8 milliards de litres d'éthanol, soit environ onze fois la production actuelle d'éthanol-maïs. De plus, dans le contexte où environ 20% de la production de maïs est destinée à la fermentation, c'est deux fois plus que l'ensemble de la production nationale de maïs qui devrait être mise à contribution. En ce sens, pour atteindre les objectifs visés par le président Bush (2007b) et le USDOE (2006) d'autres voies, et notamment la voie cellulosique, seront davantage sollicitées.

1.3.2 Le contexte canadien

L'intérêt du Canada pour l'éthanol est plus récent et sa production est moins importante. En 2004, on y produisait entre 200 et 358 millions de litres par année (ACCR, 2007; AIE, 2004; Canada, 2004), un volume bien en deçà des milliards de litres produits chez nos voisins du sud. On produirait environ 900 millions de litres en 2008 (RFA, 2009b) et la production devrait atteindre les 1,9 milliards de litres en 2009 (OCDE/FAO, 2007).

La filière actuelle de l'éthanol au Canada se divise en deux, selon les cultures céréalières déjà en place (Canada, 2007f; Forge, 2007) : d'un côté, dans l'Ouest canadien, c'est le blé ; de l'autre, au Québec et en Ontario, il est plutôt question d'éthanol-maïs. 73% de la production canadienne d'éthanol est dérivée du maïs, tandis que l'éthanol tiré du blé en représente 17% (Olar, Romain et Klein, 2004). La production d'éthanol au Canada est satisfaite par huit raffineries, dont une seule située au Québec, à Varennes (ACCR, 2007), une usine dont la production a débuté en 2007. L'enjeu de l'éthanol peut donc sembler ici moins important, vu les faibles taux de production. Toutefois, cette industrie se déploie ici selon la même logique qu'aux ÉU alors que le gouvernement canadien considère l'éthanol dans la catégorie des carburants renouvelables qui « sont des carburants plus propres qui réduisent la pollution de l'air et les émissions de gaz à effet de serre » (Canada, 2007e).

L'incitation canadienne à la production

Le gouvernement canadien a d'ailleurs mis en place un Programme d'expansion de l'éthanol (PEÉ) qui vise à faire augmenter la production et l'utilisation de l'éthanol (Canada, 2008c). Les deux premiers volets se sont déroulés respectivement à la fin de l'année 2003 et tout au long de l'année 2005. On prévoyait alors quintupler la production, pour atteindre jusqu'à un milliard de litres (Canada, 2004). Ce programme a ainsi permis de financer différents projets visant à répondre aux objectifs d'augmentation de la production et de l'utilisation de l'éthanol au Canada. Le premier volet a permis de financer directement sept projets de production commerciale d'éthanol (Canada, 2004). En 2006, le même gouvernement annonçait la création d'un fonds de 345 millions de dollars afin de stimuler la production de carburants végétaux. Visant principalement la production d'éthanol, ce fonds devrait être investi au niveau des structures de

production (200 millions de dollars) ainsi que dans la recherche et le développement, au niveau de la filière et des marchés (145 millions) (Canada, 2007a).

Différents programmes ont aussi été mis en place dernièrement par le gouvernement canadien du Premier ministre Stephen Harper, à travers la *Stratégie du gouvernement du Canada sur les carburants renouvelables* afin, notamment, de « soutenir l'expansion de la production canadienne de carburants renouvelables » (Canada, 2008d). Le 5 juillet 2007 était annoncée l'*initiative écoÉNERGIE pour les biocarburants*, promettant des investissements allant jusqu'à 1,5 milliard de dollars sur une période de neuf ans. De même, le plan budgétaire 2007 annonçait l'abolition de l'exonération de la taxe d'accise sur l'éthanol et le biodiesel à partir du 1^{er} avril 2008 (Canada, 2007e). D'autres programmes ont aussi été mis en place, tels l'IIEB¹⁵ (Initiative pour un investissement écoagricole dans les biocarburants), l'IMBP¹⁶ (Initiative des marchés de biocarburants pour les producteurs), ainsi qu'un Fonds des biocarburants de la prochaine génération¹⁷ (Canada, 2006a, 2007b, 2007g et 2008b). La loi C-33, visant à imposer un contenu minimal d'éthanol dans l'essence conventionnelle d'ici 2010, a été adoptée par le Comité sénatorial permanent de l'énergie, de l'environnement et des ressources naturelles le 26 juin 2008 (Banks, 2008). Par le biais de ces différentes mesures, le gouvernement canadien prévoit ainsi atteindre un objectif de production de 2,74 milliards de litres d'ici la fin de la décennie (Forge, 2007).

Le gouvernement du Québec (2000) a soutenu, à travers un financement de 100 millions de dollars par la Société générale de financement du Québec, l'ouverture d'une usine de production d'éthanol-maïs à Varennes, inaugurée le 20 juin 2007. Plus récemment, il annonçait également la création d'une chaire de recherche d'environ 25 millions de dollars sur la valorisation des résidus

¹⁵ « L'Initiative pour un investissement écoagricole dans les biocarburants est un programme fédéral pluriannuel de 200 millions de dollars qui prendra fin le 31 mars 2011 et qui accorde des contributions remboursables pour la construction ou l'agrandissement d'installations de production de biocarburants de transport. Pour l'obtenir, les producteurs agricoles doivent s'engager à investir dans les projets de production de biocarburants et à utiliser des matières premières agricoles pour produire les biocarburants ».

¹⁶ L'IMBP « permettra aux agriculteurs et aux collectivités rurales d'embaucher des spécialistes qui les aideront à élaborer des projets d'entreprise et à réaliser des études de faisabilité ainsi que d'autres analyses nécessaires à la création et à l'élargissement de la capacité de production de biocarburants ».

¹⁷ « Le gouvernement et TDCC [Technologies du développement durable du Canada] ont conclu un accord établissant les conditions dans lesquelles TDCC administrera le Fonds des biocarburants

forestiers à l'Université de Sherbrooke afin de favoriser la production d'éthanol cellulosique (Québec, 2007). Selon le plan d'action du Québec sur les changements climatiques, le gouvernement prévoit atteindre l'objectif de 5% d'éthanol dans les ventes de carburant d'ici 2012 (Québec, 2008). Des subventions de 6 millions dédiées à la recherche et de 20 millions pour la mise sur pied de deux usines pilotes pour la fabrication d'éthanol cellulosique au Québec ont été annoncées. Cependant, à l'automne 2007, le gouvernement québécois se ravisait quant à l'avenir de l'éthanol-maïs sur son territoire en annonçant qu'il ne favoriserait pas davantage cette filière, vu les controverses environnementales liées à la culture intensive de maïs (Cardinal, 2007). Le gouvernement cherchera plutôt à favoriser la production d'éthanol issu des résidus agricoles et de la biomasse forestière plutôt que celui issu du maïs-grain (Québec, 2008). Selon le ministre des Ressources naturelles et de la Faune Claude Béchar, « l'usine de Varennes sera la première et dernière usine d'éthanol au Québec »¹⁸ (Radio-Canada, 2007).

1.4 LES CARBURANTS VÉGÉTAUX PRÉSENTÉS COMME UNE ÉNERGIE PROPRE, VERTE ET RENEUVELABLE

Les carburants végétaux sont généralement représentés comme une forme d'énergie propre, verte et renouvelable. Toutefois, ces attributs, accolés à une action, à une technologie ou à un processus, tendent à leur assigner un sens qui se décline généralement sous la forme d'un bénéfice pour l'environnement, voire une valeur positive en soi. Ces mots contribuent à modeler nos représentations du monde et de ses objets, et comme le souligne Lucie Sauvé (2007), « les mots ne sont pas anodins, ils sont des moules à penser » (p. 5). Dans le cas des carburants végétaux, il ne fait aucun doute que ces épithètes leur attribuent, d'entrée de jeu, des vertus positives par rapport à l'environnement. En ce sens, parce qu'ils sont issus du monde végétal, cultivé et tirant leur croissance du recyclage du carbone atmosphérique, ils portent en eux les vertus d'une énergie verte.

On retrouve l'utilisation de cette typologie dans l'ensemble des écrits portant sur ces carburants. Dans les médias québécois, on les aborde généralement sous la forme de cette représentation

ProGen^{MC} de 500 millions \$. ». afin d'« accélérer la commercialisation des nouvelles technologies des biocarburants ».

¹⁸ L'usine de Varennes est une des 8 usines de production d'éthanol réparties au Canada, selon l'Association canadienne pour les carburants renouvelables (ACCR, 2007).

positive. Par exemple, on nous annonçait dans les années 1990, la voiture du 21^{ième} siècle, où la fin du pétrole n'impliquait pas la fin de la voiture, mais plutôt la naissance d'une voiture nouveau genre (AFP, 1993). Mentionnons également, pour le cas spécifique de l'éthanol-maïs, des titres d'articles comme « L'éthanol, plus propre que l'essence » (Charrette, 2003) ou encore « Sonic devient la première à offrir de l'essence verte » (Lacombe, 1994). On parle alors d'un Québec qui « biocarburera » à l'éthanol (Tremblay, 1997), de véhicules propulsés au maïs (Gagné, 1994), d'une *essence verte* (Frénière, 1993) qui, en tant que substitut à l'or noir (Cans, 1994), contribue « à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) » (Côté, 2007). Il s'agit aussi d'une occasion d'affaires (Normand, 2005) où « les producteurs de semences et les entreprises de biotechnologies flairent une nouvelle occasion alléchante [de] produire du maïs [...] pour la fabrication d'éthanol » (Pollack, 2006). Actuellement toutefois, la figure positive des carburants végétaux, tout particulièrement en ce qui a trait à l'éthanol-maïs, tend à s'assombrir, comme en témoignent ces titres de journaux « L'éthanol de la discorde » (Filion, Normand et Beauchamp, 2007), « Le mirage de l'éthanol » (Borde, 2005), « Nourrir les humains avant les VUS » (Francoeur, 2007b), « Les biocarburants ne sont pas si verts » (Lemarchand, 2007), « *Stop the agrofuel craze!* » (GRAIN, 2007b), « Biocarburants : attention, danger! » (Monbiot, 2006) pour n'en mentionner que quelques-uns. Ce changement, que nous aborderons plus tard dans ce chapitre, met en évidence que l'approche scientifique à leur sujet s'est en partie transformée. Après les avoir présentés comme une alternative verte au pétrole, le discours des experts sur la question, dans la mesure où il tend à prendre en compte l'ensemble du processus de production et de ses impacts, montre de plus en plus le côté sombre de l'éthanol-maïs, en tant qu'énergie « sale » et énergivore à produire.

Malgré cette nouvelle image, l'éthanol-maïs est encore considéré comme une énergie renouvelable. L'appellation générale de carburant végétal – ou de biocarburant – est toujours affublée de ces mêmes qualificatifs, notamment en raison des nouveaux carburants végétaux en développement. L'avènement de cette 2^{ième} génération de carburants végétaux contribue à embrouiller les distinctions avec ceux de 1^{ère} génération. En basant uniquement leurs différences sur leur unité source, ressource alimentaire contre cellulose, on risque de laisser de côté un pan des enjeux reliés à l'énergie et plus spécifiquement aux carburants végétaux.

Au niveau des gouvernements, tant canadiens, québécois qu'états-uniens, on continue de promouvoir le caractère positif des carburants végétaux. À titre d'exemple, on retrouvait dans la

documentation de Statistique Canada de 2004 qu'« utiliser de l'éthanol réduit les émissions des véhicules » (p. 16). Encore maintenant, on prétend que les carburants végétaux, tel l'éthanol-maïs, « sont des carburants plus propres qui réduisent la pollution de l'air et les émissions de gaz à effet de serre » (Canada, 2007e). On peut observer le même type de discours dans la littérature gouvernementale de nos voisins du sud avec des titres comme « *Clean energy for tomorrow* » (Dobriansky, 2006) et « *Renewables : looking toward inexhaustible energy* » (Eckhart, 2006). On parle des carburants végétaux comme une solution aux changements climatiques. Le USDOE (2006) fait la promotion des carburants végétaux, en se fixant comme objectif d'obtenir le maximum de carbone organique par surface cultivée¹⁹. Une agence internationale comme l'AIE recommandait en 2004 d'entreprendre le virage des carburants végétaux parce que ceux-ci pourraient jouer un rôle majeur en tant que mesure de réduction des GES et d'atténuation des changements climatiques²⁰.

Comment expliquer cette représentation « verte » des carburants végétaux? Est-ce l'appellation générale de biocarburants – ou de *biofuels* en anglais – qui confère cette image pro-environnement? Est-ce leurs simples origines végétales qui en feraient les porte-étendards d'une couleur associée au règne végétal? C'est un peu comme si toutes les qualités et tous les bénéfices associés aux végétaux fermentaient en un éthanol aux vertes émissions. Comme le suggère Éric Holtz-Giménez (2007), le terme biocarburant donnerait « l'image flatteuse d'une énergie renouvelable propre et inépuisable, une confiance dans la technologie et la puissance d'un progrès compatible avec la protection durable de l'environnement ». En ce sens, la conception positive des carburants végétaux, d'un éthanol-maïs à un éthanol cellulosique aux vertes vertus, semble être portée par une certaine partie de la littérature scientifique.

Une certaine littérature scientifique

Bien que les carburants végétaux aient beaucoup varié au cours des dernières décennies (nouvelles sources, nouvelles technologies, nouveaux modes de production, etc.), leur représentation en tant qu'énergie verte perdure, notamment en relation avec leur bas taux

¹⁹ Traduction libre de : « [The goal] is to obtain maximum usable organic carbon per acre in an environmentally and economically sustainable way » (p. 57-58).

²⁰ « *Biofuels can play a significant role in climate change policy and in measures to reduce greenhouse gas emissions. Biofuels have become particularly intriguing because of their potential to greatly reduce CO₂ emissions throughout their fuel cycle* ».

d'émissions de CO₂. Au cours des années 1990, l'éthanol-maïs, largement associé à une réduction des émissions de CO₂, tout en constituant un substitut au MTBE, un additif polluant (Chum, Overend et Phillips, 1993; Cole *et al.*, 1997; Rask, 1998; Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007) a alors été considéré comme une énergie propre et verte. Compte tenu de l'activité photosynthétique qui assure la croissance de la plante en captant et en fixant le carbone atmosphérique, le carburant qui en est tiré est alors vu par plusieurs comme un bon outil face au phénomène émergent des changements climatiques en étant, au pire, neutre au niveau de son bilan de carbone. Théoriquement, le carbone libéré au sortir du moteur serait alors celui qui serait par la suite réabsorbé par la plante pour être ensuite converti à nouveau en carburant. Chakravorty, Magné et Moreaux (2007) comparent ainsi l'utilisation du pétrole et des carburants végétaux de cette manière : nous avons le choix à faire entre l'utilisation d'un carburant fossile polluant et se raréfiant qui peut être substitué « *by a clean fuel produced from land* ». Ces auteurs associent ainsi le monde végétal à une énergie verte à travers l'agriculture.

Les carburants végétaux arborent aussi une image de nouveauté, particulièrement avec l'épuisement annoncé des « vieilles réserves de pétrole ». Ils incarnent en quelque sorte l'innovation technique, source de progrès. Par exemple, Lee, Glauber et Sumner estimaient en 1994 que « *transportation fuels produced from biomass, or « biofuels », account for the most significant new industrial use of agricultural materials* ». Hall et Scrase suggéraient qu'avec suffisamment de reconnaissance et de recherches, la biomasse végétale « *could become the environmentally friendly fuel of the future* » (1998). De son côté, Sanders suppose, encore maintenant, que les « nouvelles technologies » en développement « *promise to make ethanol a truly green fuel* »²¹ aux conséquences environnementales significativement moindres que celles causées par l'utilisation des carburants fossiles (Sanders, 2006). C'est aussi la possibilité d'avoir accès à un énorme bassin de carburant domestique comme l'indiquent les titres de rapports gouvernementaux de l'USDA²² (2005) et de l'USDOE²³ (2006), rapports qui explorent la possibilité de faire fermenter la cellulose. La foi dans le progrès et l'innovation technique, comme l'indique Latouche (2001), masquerait toutefois les conséquences potentielles de ces innovations.

²¹ Le mot est souligné par l'auteur dans le texte original.

²² *Biomass as feedstock for a bioenergy [...] : the technical feasibility of a billion-ton annual supply.*

²³ *Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol.*

1.5 LA FIGURE DE L'EXPERT DANS LA CONTROVERSE DES CARBURANTS VÉGÉTAUX

« L'expert scientifique est de plus en plus sollicité pour donner son avis aux décideurs. Cette transformation de la fonction sociale du savant rétroagit sur la nature du discours scientifique en accélérant le processus de pragmatisme de la science. Le scientifique qui agit comme expert auprès d'un organisme administratif est pris dans une série de questions qui ne sont pas de son ressort car en fait le discours de la science ne répond pas à la question « que faire? ». Le scientifique peut seulement formuler des pronostics touchant les conséquences possibles d'une action. Il s'agit là d'une première limite fondamentale du discours de la science, trop facilement oubliée sous la pression de la demande sociale d'expertise. ». Propos d'Olivier Clain recueillis dans (Ferrerri, 2005).

Les propos du philosophe québécois Olivier Clain, cités en épigraphe, nous permettent de mettre en exergue la figure et le rôle de l'expert scientifique dans la controverse actuelle des carburants végétaux. Cette demande sociale d'expertise, à laquelle Clain fait référence, serait une réponse à la prise de conscience et à une sensibilité citoyenne croissante envers les questions d'ordre environnemental. Cette sensibilité citoyenne pose justement la question « que faire? » et inspire le désir de passer à l'action, de poser des gestes concrets « pour l'environnement » et d'être un bon citoyen socio-environnemental. Cependant, ce bon citoyen ne risque-t-il pas d'entrer en opposition avec le bon citoyen socio-économique? Certains soutiennent qu'il faut diminuer notre empreinte écologique sur la planète en consommant mieux, voire moins. Toutefois, pour soutenir nos économies basées justement sur la consommation, d'autres soutiennent que nous nous devons de continuer à consommer goulûment, comme si l'idée de remettre en question le mode de production ne semblait pas faire partie de la solution, recherchant des voies alternatives, qui nous permettraient d'endosser les deux perspectives à la fois.

Dans le cas qui nous intéresse ici, plusieurs raisons ont mené à l'émergence des carburants végétaux comme alternative au pétrole dans les années 1990. De celles-là, l'anticipation et la prise de conscience grandissantes des conséquences du réchauffement climatique ont certes joué un rôle important dans la représentation sociale de l'éthanol-maïs – et maintenant de l'éthanol cellulosique – en tant qu'alternative propre au pétrole pouvant contrebalancer ses effets. Deux décennies de faits scientifiques, organisés en informations chiffrées, en données et en statistiques, ont permis à certains experts de présenter les carburants végétaux comme une possibilité prometteuse, présentant de nombreux bénéfices environnementaux.

Toutefois, les pronostics proposés par certains experts sur la question des carburants végétaux ne sont pas sans contradictions. On pense notamment à ceux issus du maïs. En tant que solution

sociale aux divers enjeux environnementaux liés à la question des transports. De manière générale, deux catégories argumentaires dominantes s'affrontent sur la question des carburants végétaux, et tout particulièrement dans le cas de l'éthanol-maïs. La première considère cette ressource comme une alternative viable, verte, qui permettra au secteur des transports de s'affranchir de la dépendance au pétrole et des éléments de géopolitique qui découlent de cette dépendance. De plus, elle considère cette voie comme étant le moteur du développement d'une économie locale, soutenue par l'État, notamment en agriculture. La deuxième catégorie argumentaire cherche plutôt à montrer que l'éthanol-maïs, en tant qu'alternative *propre* au pétrole, n'est dans les faits qu'un leurre. Il ne s'agirait pas d'une mesure *verte et propre*. Au mieux, les carburants végétaux ne seraient qu'une nouvelle niche économique dans le secteur énergétique en mouvement, qu'on chercherait à légitimer dans la situation actuelle des changements climatiques anticipés et face à la crise du pétrole. Cependant, opposants et partisans des carburants végétaux de 1^{ère} génération se retrouvent généralement promoteurs de la seconde voie : les carburants de 2^{ème} génération comme alternative au pétrole et à ceux de 1^{ère}. Or, l'option cellulosique dépend essentiellement des promesses de développement des biotechnologies, à grand renfort de manipulations génétiques et du développement de variétés végétales à haut rendement. Là encore, toutefois, tout comme l'a été le cas de l'éthanol-maïs, cette transition vers l'option cellulosique repose sur quelques pronostics, sur une technologie toujours en développement, sur une ressource végétale destinée à remplacer dans une large mesure le pétrole et surtout sur l'absence d'examen des autres mesures pour réduire notre consommation d'énergie et nos émissions de GES.

1.6 SYNTHÈSE DE LA PROBLÉMATIQUE : L'OBJET DE RECHERCHE

Dans les pages qui précèdent, nous avons tenté de faire ressortir l'ampleur de la situation des carburants végétaux dans le monde tout en signalant l'importance toute particulière de l'éthanol-maïs en Amérique du Nord. Actuellement, l'éthanol est considéré comme l'une des options clés des politiques énergétiques (AIE, 2004) et de la lutte aux changements climatiques (Stern, 2007), tant au Canada (Canada, 2007e; Forge, 2007; Québec, 2008) qu'aux ÉU (Bush, 2007b; Shapouri, Duffield et Wang, 2002; USDA, 2005; USDOE, 2006). Les gouvernements s'appuient sur divers arguments pour faire la promotion de l'éthanol. L'éthanol-maïs est généralement perçu comme un des éléments importants d'un portfolio de mesures pour lutter contre le réchauffement climatique

anticipé grâce à son potentiel de réduction des émissions de GES générées par le secteur des transports. La production d'éthanol domestique laisse aussi entrevoir une plus grande sécurité énergétique, devant l'instabilité des sources d'approvisionnement et la diminution des réserves mondiales de pétrole. Considéré comme une forme d'énergie renouvelable, l'éthanol aurait moins d'effet sur l'environnement que n'en provoquent les énergies fossiles. Elle présenterait même, pour certains, des bénéfices pour la biodiversité et le maintien des écosystèmes.

Par contre, ces représentations, « vertement » critiquées, sont de plus en plus l'objet de controverses (Hill *et al.*, 2006; Patzek, 2006a; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007; Runge et Senauer, 2007; Scharlemann et Laurance, 2008). L'éthanol-maïs n'augmenterait pas la sécurité énergétique des EU ; sa production et son usage risqueraient même d'augmenter sa dépendance au pétrole. Les carburants végétaux de 1^{ère} génération auraient des conséquences socio-environnementales encore plus importantes que le pétrole. De plus, leur production serait fortement dépendante du soutien financier de l'État.

Plusieurs types de carburants végétaux sont actuellement sur le marché. De ceux-ci, l'éthanol-maïs ainsi que l'éthanol issu de la canne à sucre dominant largement la production. Selon la littérature toutefois, ces productions, tout particulièrement celles d'éthanol-maïs, ne sont pas exemptes de problèmes. Les différents défis auxquels font face ces carburants de 1^{ère} génération ont stimulé le développement d'une nouvelle génération de carburants végétaux, issus cette fois principalement de la cellulose (Doornbosch et Steenblik, 2007; Kim et Dale, 2004; Sanderson, 2006). Ces nouvelles technologies, qui reposent sur la possibilité de faire fermenter les sucres principalement contenus dans la cellulose (USDOE, 2006), sont à ce jour toujours dans une phase de recherche et développement. La production des carburants de 2^{ème} génération n'est pas encore possible à l'échelle commerciale. Toutefois, leur potentiel économique, leurs rendements énergétiques ainsi que leurs conséquences socio-environnementales sont encore largement méconnus (Burt, 2006; Palmer, 2007; Righelato et Spracklen, 2007).

Souvent partielles, les recherches dans le champ des carburants végétaux offrent généralement la possibilité de les apprécier en fonction d'un ou de quelques critères seulement. Les études portent généralement sur la viabilité de ces carburants en tant qu'alternative au pétrole. Les analyses proposés se concentrent sur quelques aspects seulement de l'objet, par exemple le potentiel de production, la production d'énergie de la culture, le potentiel de réduction des GES ou encore la

minimisation des coûts d'exploitation (Bastianoni et Marchettini, 1996; Hanegraaf, Biewinga et van der Bul, 1998). Cependant, ces études méconnaissent généralement les conséquences d'une intensification des cultures sur les écosystèmes naturels. Elles sont porteuses d'une vision utilitariste de la nature, considérant en quelque sorte le monde végétal comme une ressource à portée du moteur. Les effets sociaux des carburants végétaux sont très peu considérés dans le débat sur les impacts environnementaux. Toutes ces études s'appuient généralement sur un scénario *business-as-usual* en ce qui a trait à notre consommation énergétique, qu'il s'agisse, pour ne prendre que cet exemple qu'on pourrait multiplier à l'infini, du transport automobile, où la puissance des cylindrées, ainsi que la taille des véhicules et leur consommation, échappent à l'analyse. En ce sens, la prétention de trouver une option au pétrole sans questionner les autres paramètres de l'équation demeure une entreprise partielle ayant peu de chance de constituer une réponse significative et risquant de provoquer des effets pervers des plus problématiques.

Certes, d'autres recherches émergentes tentent d'offrir une vision plus large et plus intégrée. Plutôt que de hiérarchiser les critères, ces études tentent davantage de resituer les carburants végétaux dans un contexte plus global, cherchant à savoir si l'option de l'éthanol peut être considérée comme une alternative viable au pétrole en fonction d'études multicritères. Pour von Blottnitz et Curran (2007), « *the ecological advantages should outnumber, or outweigh, the disadvantages to the environment and human health* » (p. 616). McLaughlin et Walsh (1998) cherchaient à comparer les coûts et les bénéfices environnementaux des cultures énergétiques. On devrait ainsi être en mesure de penser l'énergie en fonction des avantages écologiques ou des bénéfices environnementaux qu'ils nous offrent pour juger de leur viabilité. Dans cette veine, Hill (2007) a élaboré trois critères selon lesquels on pourrait considérer une énergie d'origine végétale comme une option viable : (a) un bilan énergétique plus important que les ressources énergétiques investies dans sa production, (b) des conséquences environnementales inférieures aux carburants fossiles et (c) des coûts de production compétitifs et une capacité de production suffisante pour répondre à la demande.

Sheehan *et al.* (2003) ont réuni un ensemble de critères permettant d'étudier la viabilité de l'utilisation de la paille de maïs. Ces auteurs ont identifié les critères suivants : sécurité énergétique, émissions de GES et de polluants atmosphériques, eutrophisation, pollution des cours d'eau, utilisation des terres et biodiversité, santé des sols, impacts économiques sur les communautés locales. Peu d'études se sont toutefois attardées au cycle de vie complet de

l'éthanol. Il est d'ailleurs difficile d'anticiper les effets à long terme de l'éthanol sur la qualité de l'air. De même, ce type d'étude n'envisageait pas encore les effets sociaux résultant de la frénésie des carburants végétaux. Jusqu'à tout récemment, très peu d'études avaient anticipé les interactions possibles de la production d'énergie à partir de cultures également destinées à l'alimentation. Sauf certains, comme Lester Brown il y a déjà 5 ans²⁴, très peu avaient anticipé les problématiques sociales actuellement à l'œuvre, telle que la crise alimentaire et l'augmentation des prix des denrées.

La controverse socio-environnementale, portant sur la viabilité des carburants végétaux de 1^{ère} génération contribue à accélérer le développement et la transition vers les carburants végétaux de 2^{ème} génération. Dans la majorité des études pourtant, leur viabilité repose sur des modélisations qui, à l'instar des carburants de 1^{ère} génération, ne s'appuient que sur quelques critères. Aucune étude de cycle de vie ne peut être réellement mise en œuvre sur cette énergie encore au stade de développement. Par ailleurs, aucune étude ne questionne les risques du développement rapide de la transgénèse végétale, en l'absence de dispositifs d'évaluation scientifique et sociale rigoureux et indépendants (Le Curieux-Belfond *et al.*, 2008), élément indispensable afin d'avoir accès au volumineux bassin de sucre cellulosique.

En regard de l'important corpus scientifique s'attardant à la question de l'éthanol, nous avons choisi d'étudier le cas exemplaire de l'éthanol-maïs en Amérique du Nord. Nous avons également choisi de nous attarder principalement au cas de la paille de maïs – que nous nommerons aussi éthanol-maïs cellulosique – afin de traiter du cas des carburants de 2^{ème} génération. Nous avons choisi d'observer ces deux cas, en tant qu'alternative viable et partielle aux carburants fossiles.

Question de recherche

À partir des interrogations et des informations précédentes, nous avons formulé notre principale question de recherche qui peut se résumer ainsi : les principaux carburants végétaux de 1^{ère} et de 2^{ème} générations peuvent-ils représenter une alternative viable, même partiellement, aux carburants fossiles? Ce mémoire a pour objectif d'examiner la viabilité des carburants végétaux

²⁴ Voir l'ouvrage de Lester Brown *Eco-Economy. Building an Economy for the Earth*, 2001, 224 p., aux éditions W. W. Norton & Company. disponible en ligne sur le site du *Earth Policy Institute* à

de 1^{ère} et de 2^{ème} générations, à partir principalement du cas exemplaire de l'éthanol issu du maïs et de ses impacts socio-environnementaux.

CHAPITRE II

ORIENTATIONS MÉTHODOLOGIQUES

Cette section présente les approches méthodologiques qui ont permis de structurer la récolte et l'analyse des données de notre recherche exploratoire et évaluative. Très peu d'études universitaires au Canada portent spécifiquement sur la question des carburants végétaux²⁵. Bien que l'usage d'éthanol d'origine végétale remonte à plus d'un siècle, les carburants végétaux constituent un phénomène relativement nouveau, dont l'ampleur est grandissante (*voir* chap. 1). Alors que les carburants végétaux de 1^{ère} génération, l'éthanol-maïs en tête, sont de plus en plus objets de controverses, ceux de 2^{ème} génération, encore relativement peu explorés, notamment au plan de la recherche universitaire au Canada²⁶, sont plus difficiles à analyser, vu le caractère éparpillé et limité des informations disponibles.

La pertinence de notre recherche tient notamment à l'ampleur des enjeux et des impacts et à l'actualité du phénomène des carburants végétaux. Au cours de la dernière année, la question des carburants végétaux de 1^{ère} génération est passée d'une controverse essentiellement scientifique à une controverse socio-environnementale globale, par la publication de nombreux rapports d'organismes internationaux, d'ONG et de gouvernements, sans compter la couverture médiatique sur la question, alors le phénomène des carburants végétaux de 2^{ème} génération émerge en tant

²⁵ Nous avons pu recenser les thèses suivantes : Dolce, René. 1989. « Les céréaliculteurs et l'éthanol au Québec : une étude exploratoire des liens entre l'agriculture et l'industrie ». M., Montréal, Département de sociologie, Université du Québec à Montréal ; Klupfel, Ellen Joanne. 2004. « Opportunities and Barriers for a Crop-Based Energy Sector in Ontario ». Ph.D., Canada, University of Guelph (Canada) ; Terrier, Philippe. 2005. « Influence de l'utilisation du biocarburant E85 sur les émissions polluantes d'un véhicule hybride électrique ». M.Eng., Canada, École de Technologie Supérieure (Canada) ; et Venema, Henry David. 2004. « An Ecosystem Approach to Climate Policy : The Role of Rural Renewable Energy Design ». Ph.D., Canada, University of Waterloo (Canada).

²⁶ Mentionnons le récent groupe de recherche *McGill Network for Innovations in Biofuels and Bioproducts* (<http://mcnibb.mcgill.ca/index.html>).

que nouvelle alternative partielle aux carburants fossiles. Bien que la mise en production des carburants végétaux de 2^{ième} génération n'est pas encore tout à fait au point, l'évaluation de leurs impacts socio-environnementaux potentiels est d'autant plus pertinente, voire essentielle alors que les pouvoirs publics et l'industrie investissent massivement pour le développement de cette filière. Il est cependant difficile d'obtenir des informations précises quant aux risques et aux bénéfices réels que présente cette option, tout simplement parce qu'elle ne fait pas l'objet d'analyses approfondies en ce sens ni de contre-expertise indépendante. La dernière partie de ce mémoire tient donc d'un travail de synthèse des pronostics sur les carburants végétaux de 2^{ième} génération, mettant d'abord en évidence les lacunes en matière d'information et d'analyse sur les conséquences et les risques de la mise en œuvre d'une telle option.

Ce mémoire se veut une recherche synthétique, de type étude de cas, basée sur une importante revue de littérature, où nous cherchons à comprendre le phénomène des carburants végétaux dans son ensemble, afin d'en évaluer les impacts socio-environnementaux et la viabilité en tant qu'alternative partielle aux carburants fossiles. Nous avons mené cette étude de cas dans une perspective exploratoire, descriptive et évaluative, selon la typologie de Merriam (1988), exploratoire en ce sens qu'une étude du cas des carburants végétaux, tout particulièrement de ceux de 2^{ième} génération, nécessite un important travail de débroussaillage des informations actuellement disponibles. En ce sens, nous avons appuyé notre étude sur une stratégie de recherche au « design flexible » (*flexible design*) (Robson, 2002), qui nous a paru essentielle, notamment dans le cas d'un objet d'étude qui est aujourd'hui un sujet d'actualité dont l'information ne cesse de se renouveler. Cela nous a permis de faire émerger notre questionnement et les catégories d'analyse tout au long de la récolte des informations. Comme le soulignent Contandriopoulos *et al* (2005) ainsi que Karsenti et Dermers (2000), l'étude de cas, en tant que composante d'une recherche qualitative et synthétique, permet d'observer et d'analyser un phénomène en cours de processus dans lequel le chercheur exerce très peu de contrôle sur les variables affectées à l'étude.

Dans cette recherche exploratoire, nous tentons ainsi de dresser l'état de la situation des deux premières générations de carburants végétaux à travers les cas de l'éthanol-maïs et de l'éthanol-maïs cellulosique (issu de la paille de maïs), où leurs poids relatifs dans leurs générations respectives de carburants végétaux permettent d'en faire des cas exemplaires. Compte tenu que la 1^{ère} génération est déjà en production et que la 2^{ième} est toujours en développement, étant posée en

alternative à la première, il nous a également paru essentiel de les aborder séparément. L'évaluation des impacts socio-environnementaux de ces carburants végétaux vise à évaluer dans quelle mesure ils peuvent réellement être considérés en tant qu'alternative viable et partielle aux carburants fossiles. Précisons ici que nous nous attachons essentiellement aux carburants fossiles, sans toujours prendre en compte autant que nous l'aurions souhaité, l'ensemble des éléments qui devraient l'être dans une analyse globale d'un tel dossier, à savoir, notamment la taille et la consommation énergétique du parc automobile, les politiques publiques de transport, etc... autant de questions qui malgré leur pertinence dépassent largement l'ampleur d'un mémoire de maîtrise.

Cette recherche s'appuie sur la littérature scientifique (e.g. articles et rapports scientifiques) permettant non seulement de nourrir l'analyse factuelle du dossier, mais d'observer également les modalités de construction discursive de la problématique des carburants végétaux à travers les discours divers et souvent contradictoires des experts sur la question.

Il est clair pour nous que toute recherche implique des présupposés qui représentent le rapport idéologique qu'entretient le chercheur avec son objet. Nous favorisons alors une approche qui rejette l'idée du chercheur désincarné de son objet et celle d'une réalité connaissable de manière objective et indépendante de référents initiaux, conceptuels et idéologiques. Comme le soutiennent Fourez, Englebert-Lecomte et Mathy (1997), tout sujet connaissant appartient à un ou plusieurs groupes sociaux, dont les membres partagent des projets, des histoires et des représentations du monde, ainsi que des intérêts et des contingences qui influencent leurs connaissances et leurs rapports à la connaissance. Les savoirs y sont socialement admis, construits par et pour des acteurs sociaux, y compris par des scientifiques, à travers négociations, accords et rapports de force. Le langage, tel que l'est le discours écrit, représente alors la modalité et le lieu où chacun se rencontre, négocie cette connaissance et construit un certain rapport au monde et aux enjeux qui le traversent.

L'importance de la parole de l'expert dans la prise de décision rend également le contenu de la littérature scientifique importante à nos yeux. Les conclusions qui ressortent de la littérature scientifique jouent souvent un rôle majeur dans les orientations de nos sociétés. Or, comme nous l'avons évoqué plus haut, l'univers scientifique se complait généralement dans ce que Salomon (2003) désigne comme un « complexe du délice technique », axé davantage sur la réalisation des moyens techniques que sur celle des fins.

Dans le cas des carburants végétaux et de l'argumentaire environnemental qui s'y rattache la parole de l'expert est donc un objet d'analyse fort pertinent permettant de suivre l'évolution de ces débats. Rappelons en effet que, soutenu par les pouvoirs publics (subventions, incitatifs financiers et autres formes de soutien gouvernemental) et stimulé par un discours marchand (vantant les mérites de son développement), le travail de légitimation sociale d'une transition vers les carburants végétaux s'appuie fortement sur un certain discours scientifique. Nous précisons bien « un certain discours scientifique », car, comme nous le verrons dans ce mémoire, ces discours ne sont aucunement homogènes et traduisent des prémisses théoriques et méthodologiques souvent fort différentes, voire opposées, ainsi que des perspectives soit étroitement liées à un impact ciblé ou au contraire s'attachant à plusieurs, voire à l'ensemble des impacts directs et indirects. Dans la mesure où les numérateurs et dénominateurs de l'analyse ne sont pas les mêmes, les conclusions varieront donc passablement.

2.1 LES OUTILS DE RECHERCHE

2.1.1 La revue de littérature

Afin d'élaborer la réflexion constituante de ce mémoire, nous avons établi un important corpus d'écrits scientifiques sur la question des carburants végétaux. Celui-ci a été constitué en plusieurs étapes, qui feront l'objet de cette section.

Comme nous le verrons par la suite, nous avons d'abord procédé à un premier repérage d'articles dans les différentes bases de données à l'aide d'une série restreinte de mots-clés, portant sur la période 1990 à aujourd'hui. Ce premier repérage a donné lieu à la récolte de plusieurs centaines d'articles scientifiques. Par ailleurs, cette question étant un vif objet de controverse sociale, nous ne pouvions ignorer les articles d'actualités produits tout particulièrement dans les quotidiens canadiens et états-uniens depuis 1990 portant essentiellement sur le développement, le déploiement et les impacts des carburants végétaux, sans toutefois prétendre aucunement à un examen exhaustif de deux décennies de documents d'actualité. Compte tenu de l'ampleur du débat politique sur ces questions, il était également essentiel de repérer les documents gouvernementaux, principalement ceux du Canada et des ÉU portant sur les deux dernières décennies ainsi que les nombreux rapports d'organismes internationaux, notamment ceux, comme

nous le verrons plus loin en détail, s'intéressant de près aux questions de l'énergie (e.g. AIE), de l'agriculture (e.g. FAO) et de l'environnement (e.g. GIEC). Enfin, comme dans toute controverse scientifique et sociale, les ONG jouent souvent un rôle clé, nous avons donc, à partir des mêmes critères de recherche, jugé essentiel de repérer leurs productions documentaires (e.g. Greenpeace).

Les articles issus de la littérature scientifique nous ont servi à la constitution du corpus central des données à des fins d'analyse. Les autres éléments de cet ensemble de documents nous ont notamment servi à l'élaboration des éléments de problématiques propres à la question des carburants végétaux.

À l'instar notamment des derniers rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007a, b et c) et du rapport Stern (2007), de nombreux écrits s'intéressent aux solutions à mettre en œuvre face à la problématique des changements climatiques. Ces dernières années, différents organismes ont commencé à donner leur avis sur le cas des carburants végétaux, sous l'angle de l'énergie, du pétrole, des transports, de la sécurité alimentaire ou encore de la pérennité de la biodiversité. Au cours des derniers mois de notre rédaction, la question spécifique de la sécurité alimentaire est celle qui a généré le plus d'écrits sur les carburants végétaux, tout particulièrement quant à la responsabilité des carburants végétaux de 1^{ère} génération dans la consolidation de la crise alimentaire et sur le rôle que pourrait jouer ceux de 2^{ème} génération pour potentiellement l'éviter. On peut penser à l'Agence internationale de l'énergie (AIE), à l'Association pour l'étude du pic de pétrole et de gaz naturel (ASPO), à la Convention pour la diversité biologique (CBD), à l'Organisation mondiale pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), à l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), au programme des Nations-Unies pour l'environnement (PNUE), à l'UNESCO. On peut penser également à des organismes tels que *Biofuelwatch*, *Corporate Europe Observatory* (CEO), *Energy Watch Group* (EWG), *Greenpeacc*, *Food and Water Watch* (FWW), *Natural Resources Defense Council*, *Worldwatch Institut* (WI). Dans la même veine, certains magazines grand public ont aussi fait état des carburants végétaux à travers la publication d'éditions spéciales, notamment *Le Courrier international*²⁷, *Seedling*²⁸ et *The ecologist*²⁹. Certains journalistes et chroniqueurs ont aussi beaucoup écrit sur la question, c'est le cas au

²⁷ « Biocarburants : L'arnaque », *Le courrier international*, no. 864, 24 mai 2007.

²⁸ « Agrofuels special issue », *Seedling*, juillet 2007.

²⁹ *The Ecologist*, no. 37, mars 2007.

Québec de François Cardinal (La Presse), de Louis-Gilles Francœur (Le Devoir), et c'est le cas en Angleterre George Monbiot³⁰ ou encore de Fabrice Nicolino en France³¹. Ces lectures et interprétations de la question des carburants végétaux se sont avérées être éminemment pertinentes dans le processus de construction de notre réflexion.

Au plan gouvernemental, les informations disponibles dans les nombreux ministères fédéraux canadiens et provinciaux du Québec se sont révélées fort utiles, notamment celles en provenance des ministères fédéraux d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, d'Environnement Canada, du ministère des Finances Canada, de Ressources naturelles Canada. Dans le cas du Québec, notre attention s'est portée sur les publications d'Agriculture, Pêcheries et Alimentation Québec, du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, de Ressources naturelles et Faune Québec ainsi que le Conseil national de recherches du Canada et le site du Premier ministre du Québec. La documentation en provenance de plusieurs bureaux et départements gouvernementaux des ÉU a également représenté une importante source d'informations ; notons le *U.S. Department of Agriculture* (USDA), le *U.S. Department of Energy* (USDOE) et les derniers discours du président sur l'État de l'Union. Les informations et définitions qu'on y trouve s'avèrent être des plus pertinentes notamment parce que, s'appuyant sur une certaine partie de la littérature scientifique seulement, elles reflètent la position gouvernementale au sujet des carburants végétaux et justifient les positions gouvernementales au regard de la réglementation et des programmes de financement dans les secteurs agricoles et de l'énergie.

Au plan statistique, les diverses données sur les carburants végétaux, sur l'agriculture et sur leur consommation, fournies tant par Statistique Canada et l'*U.S. Energy Information Administration* (EIA), que par des groupes d'intérêts liés aux secteurs industriels, tels que l'Association canadienne des carburants renouvelables (ACCR), *Biofuels international*, la *British Petroleum* (BP), la *Governors' Ethanol Coalition* et la *Renewable Fuels Associations* (RFA) nous ont permis d'établir le portrait mondial et régional de la production de carburants végétaux ainsi que les productions agricoles.

³⁰ Voir en ligne : <http://www.monbiot.com>

³¹ « La faim, la bagnole, le blé et nous ». disponible en ligne : <http://fabrice-nicolino.com/biocarburants>

2.1.2 La revue de la littérature et la collecte des données

Nous avons par la suite constitué le corpus principal d'articles scientifiques servant à approfondir et à asseoir la réflexion de notre étude de cas. Pour ce faire, nous avons effectué une importante recherche bibliographique systématique afin de rassembler et de cibler les principaux écrits scientifiques sur la question des carburants végétaux. Les bases de données suivantes, disponibles en ligne et auxquelles nous avons accès en fonction de notre institution universitaire d'appartenance, nous ont permis d'effectuer une recherche bibliographique intensive : *Current contents, Environmental Sciences and Pollution Management, Francis, Google scholar, PubMed, Science Direct, Source de l'ICIST, Scopus, SpringerLink, Synergy, ToxSeek, Web of science*. Les mots-clés utilisés pour procéder à cette recherche bibliographique ont été les suivants, soit tous ceux touchant aux carburants végétaux et plus spécifiquement au cas du maïs : *alcohol fuel, agrofuel, alternative fuel, alternative energy source, bioenergy, bioethanol, biofuel, biogas, biomass, biomass energy, biomass fue), cellulosic ethanol, corn, corn ethanol, corn residues, corn stover, corn wastes, E10, E85, E100 energy crop, ethanol, ethanol fuel, gasohol, maize, renewable energy, starch crop, Zea mays*.³² Il est important de noter qu'un phénomène de recherche en cascade s'est aussi produit, au fil de l'examen attentif effectué des articles repérés, qui nous ont menés à des revues scientifiques n'appartenant pas toujours à celles qui étaient disponibles dans les bases de données préalablement utilisées. Cette recherche nous a ainsi permis d'établir un important corpus de plusieurs centaines d'articles scientifiques sur les cas de l'éthanol produit à partir du maïs-grain et de la paille de maïs, ainsi que sur celui des carburants végétaux en général.

Notre mémoire s'intéresse premièrement au cas spécifique de l'éthanol-maïs nord-américain depuis le début de la décennie 1990. Cette décennie a marqué le début de la croissance de la production mondiale de l'éthanol ainsi qu'un engouement progressif pour cette forme d'énergie. Le contexte nord-américain de l'éthanol-maïs, principalement à cause du statut de premier producteur des États-Unis, représente à lui seul et de manière exemplaire le phénomène complexe des carburants végétaux. Nous nous sommes ensuite intéressés, pour la même période de temps, toujours en Amérique du Nord, au cas de l'éthanol produit à partir de la biomasse cellulosique,

³² À ceux-ci s'ajoutent les termes français suivants : agrocarburant, biocarburant, bioénergie, bioéthanol, biomasse, biogaz, carburants végétaux, carburoculture, énergie renouvelable, éthanol, éthanol-maïs, maïs, or vert, paille de maïs et résidus agricoles.

principalement au cas de la paille de maïs. Parce que la paille de maïs, en tant que résidu agricole, ne couvre pas à elle seule l'ensemble des enjeux reliés aux carburants végétaux de 2^{ème} génération, nous nous sommes aussi intéressés aux cas des cultures énergétiques pérennes, de la sylviculture énergétique et des résidus forestiers, un cas qui nous touche de plus près au Québec.

Nous avons ensuite opéré un processus de sélection de notre revue documentaire afin d'en constituer un corpus central d'écrits scientifiques plus ciblé. Le choix spécifique des composantes du corpus central s'est fait selon une approche de représentativité sociologique, présentée par Sabourin (2004). Selon cette approche, les écrits sont considérés comme autant de points de vue particuliers sur un même objet. Ils témoignent alors de l'activité idéologique des scientifiques en action en dévoilant « une démarche spécifique aux personnes et aux groupes qui, dans le cours de leurs activités sociales quotidiennes, élaborent des idées et entrent en contact avec les idées des autres, transformant le sens » des choses, de la langue, de nos représentations du monde, etc. (p. 372).

Cette opération nous a permis de sélectionner les éléments les plus pertinents pour notre corpus en fonction de l'appartenance à l'une ou l'autre des catégories « limitantes » de notre recherche. Ces catégories « limitantes », comme le souligne Comeau (1994), sont soit déterminées au préalable dans un ancrage théorique (catégories formelles), soit « prises ou inspirées directement du terrain » (catégories substantives). Dans le cadre de ce mémoire, ce terrain d'étude correspond à la littérature scientifique. Comme nous le verrons à la section suivante, nous avons, lors de la mise en place de la problématique, identifié certaines de ces catégories « limitantes », auxquelles de nouvelles se sont ajoutées, d'autres se sont précisées, voire même éliminées, selon un processus itératif qui s'est déroulé tout au long de la démarche de recherche. Les écrits ont été sélectionnés et classés en fonction de la thématique centrale de leur argumentaire.

2.2 LE TRAITEMENT QUALITATIF DES DISCOURS ÉCRITS

Nous avons tout d'abord choisi de produire intégralement les éléments de discours écrits retrouvés dans les articles scientifiques et traitant de notre objet d'étude. Cela nous a semblé important et utile afin que tous les éléments de discours aient la même structure, et surtout pour que les nombreuses relectures et réorganisations en soient facilitées. Nous avons noté et conservé

toutes les hypothèses, observations, intuitions et catégories de sens qui ont émergé au cours de ce processus de transcription.

Comme nous l'avons mentionné, notre démarche s'est construite selon une perspective exploratoire et évaluative. Dès l'étape de la revue de la littérature, nous avons formulé des catégories limitantes afin de classer les différents extraits les plus significatifs des discours écrits. Cela nous a notamment permis d'organiser les extraits selon leurs contingences particulières, relevant des domaines soit scientifique, économique, écologique ou strictement politique. Toutefois, très rapidement, nous nous sommes rendu compte de la difficulté de faire entrer tel ou tel propos dans une seule catégorie à la fois. Tout au long de cette revue de la littérature, nous en sommes venus à considérer cette difficulté en réorganisant ces catégories. Nous nous sommes ainsi notamment basés sur les travaux de Hill (2007) et Sheehan *et al.* (2003). Ces auteurs ont identifié plusieurs critères à observer afin de considérer la viabilité d'une option énergétique comme l'éthanol, issu du maïs et de la paille de maïs, comme nous le verrons ultérieurement. À partir de ces catégories formelles, de nouvelles catégories substantives ont pris forme. Les nombreuses relectures des éléments de discours sélectionnés nous ont permis de préciser leurs idées et leurs thèmes récurrents. Les transcriptions ont alors été organisées selon ces idées et ces thématiques, en tant que catégories substantives à expliquer, à décrire, induites lors des lectures. Une lecture attentive nous a permis d'identifier les tendances dominantes particulières de chaque article scientifique inclus dans ce corpus. Nous avons retenu principalement les thématiques suivantes : les taux d'émissions de GES, la balance énergétique, les effets environnementaux sur les sols, l'eau, l'air, l'intégrité de la biodiversité et la pression sur les écosystèmes, et les effets socio-économiques de la sécurité énergétique, le développement régional, les coûts de production et la sécurité alimentaire.

Certes nous aurions pu étendre notre champ d'études à davantage de critères. Les limites de temps et l'ampleur du travail exigé dans le cadre d'un tel mémoire nous ont incités à limiter le choix afin d'en faire une analyse plus approfondie et plus concluante. Par exemple, nous avons choisi de laisser de côté le traitement en profondeur de catégorie substantive tels le degré d'indépendance des experts scientifiques ou encore les impacts sur la santé humaine des composés volatils émis par la combustion de l'éthanol.

C'est ainsi que nous avons exploité des stratégies de type inductives, comme le décrit Chevrier (2004), où, à partir des informations recueillies, « le chercheur élabore des hypothèses [...] visant à comprendre, en tout ou en partie, le phénomène » (p. 77). Il s'agit de donner un sens à des discours. Comme le souligne Sabourin (2004), « les écrits font état d'une connaissance du monde plutôt que de simplement contenir des informations à propos du monde vécu » (p. 368). Cela nous a permis de dégager une description de la question des carburants végétaux à partir d'écrits afin d'en produire une évaluation.

CHAPITRE III

LES IMPACTS DE LA PRODUCTION D'ÉTHANOL À PARTIR DU MAÏS-GRAIN

Ce chapitre, qui s'appuie sur une revue de littérature portant sur les impacts socio-environnementaux de la production de l'éthanol-maïs, vise à mettre en évidence dans quelle mesure ce carburant d'origine végétale peut être considéré comme une alternative viable aux carburants fossiles. Souvent centrée sur les impacts de la production et des usages de l'éthanol-maïs, la littérature scientifique sur le sujet, témoigne de l'ampleur de la controverse relative à l'éthanol-maïs. D'ailleurs, les conclusions de ces textes scientifiques sur les effets de la production de l'éthanol-maïs, presque exclusivement états-uniens, à l'exception de quelques études canadiennes (Berthiaume, Bouchard et Rosen, 2001; Canada, 2000; Chan, Hoffman et McInnis, 2004; Spatari, Zhang et Maclean, 2005), varient considérablement d'une étude à l'autre au point, parfois, d'être assez contradictoires.

3.1 LA PRODUCTION D'ÉTHANOL-MAÏS

3.1.1 Le bilan des émissions de gaz à effet de serre de l'éthanol-maïs : une énergie propre?

Dans l'actuel contexte des changements climatiques, la question du bilan des émissions de GES de l'éthanol est souvent mise à l'avant-plan. On nous parle ainsi d'une « *efficient sources of energy that contribute to the reduction of greenhouse gas emissions* » (De Oliveira, Vaughan et Rykiel Jr., 2005, p. 593). Il s'agit sans contredit d'un enjeu majeur, notamment par l'association intime des carburants végétaux à deux secteurs qui sont de grands émetteurs de GES : les transports et l'agriculture. Chacun d'eux serait responsable d'environ 14% des émissions globales

de GES (Stern, 2007). C'est dans ces secteurs que les augmentations des émissions auraient été les plus importantes depuis les trente dernières années (GIEC, 2007c). Comme nous le verrons, nombre d'experts considèrent que l'éthanol émet moins de GES que l'essence. En revanche, plusieurs études récentes démontrent le bilan négatif associé à la production et à l'usage de l'éthanol-maïs (Patzek *et al.*, 2005; Pimentel, 2003; Pimentel et Patzek, 2005, 2007; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007; Searchinger *et al.*, 2008).

Un potentiel de réduction des GES

Parmi ceux qui présentent l'éthanol en tant que carburant offrant un fort potentiel de réduction de GES, Swisher (1994) par exemple, considère que le développement de ce secteur énergétique s'inscrit en tant que mesures et actions de réductions des émissions de CO₂ à mettre en œuvre, au même titre que la protection des forêts et la reforestation en général. Pour cet auteur, les carburants végétaux «*can contribute significantly to the reduction of global CO₂ emissions*». Pacala et Socolow (2004) considèrent les carburants végétaux, l'éthanol-maïs en tête, comme une mesure permettant d'atténuer le phénomène du réchauffement climatique. Pour eux, «*the choice today is between action and delay*» (p. 968) : cette énergie pourrait ainsi remplacer l'utilisation des carburants fossiles et être un outil efficace dans la lutte aux changements climatiques.

Pour tenter de démontrer que l'éthanol-maïs constitue un carburant propre pouvant contribuer à la lutte aux changements climatiques, on le compare généralement à son équivalent en carburants fossiles. Ainsi, Farrell *et al.* (2006) soutiennent que l'éthanol-maïs peut aider à atteindre divers objectifs environnementaux, comme la réduction de la consommation de pétrole et des émissions de GES. La production d'éthanol-maïs, en tant que carburant destiné aux transports, serait «*much less petroleum-intensive than gasoline*» (p. 506). Selon leur étude, l'éthanol-maïs permettrait de réduire d'environ 13% les émissions de GES liées aux transports par rapport à l'essence.

Pour Cole *et al.* (1997) «*Reductions in fossil C consumption by agriculture and the production of biofuels are mitigation options which can, in principle, be maintained indefinitely*» (p. 223). La proposition de ces auteurs repose sur le potentiel prétendument infini des carburants végétaux à réduire ces émissions, en les plaçant en vase clos, dans un système fermé où le carbone voyagerait simplement de la plante au moteur et du tuyau d'échappement à l'atmosphère, pour retourner à la

plante et ainsi de suite. L'AIE (2004) décrit également l'éthanol-maïs comme un carburant ne participant pas à la mise en circulation de CO₂ additionnel dans le système atmosphérique (p. 20). Selon ces auteurs, le carbone émis ne serait pas nouveau dans la mesure où il a déjà été préalablement fixé dans la plante durant sa croissance. L'utilisation de l'éthanol-maïs aurait alors, dans le pire des scénarios, un impact neutre en termes d'émissions de carbone. Cependant, dans le meilleur des cas comme le souligne Koonin (2006), le chef scientifique de la BP, l'utilisation de l'éthanol-maïs aurait un impact positif car, contrairement à la combustion des carburants fossiles émettant de nouvelles molécules de carbone, cette fois les molécules émises dans le système s'y trouvaient déjà. En ce sens, les carburants végétaux pourraient répondre à la préoccupation sociale des GES dans la mesure où ils pourraient recycler « *carbon dioxide that was extract from the atmosphere in producing biomass* » (p. 435). L'éthanol-maïs posséderait donc, selon ces auteurs, un net potentiel de réduction des émissions de GES au sortir du moteur.

En ne s'arrêtant qu'à sa combustion dans le moteur plusieurs considèrent donc que l'éthanol, peu importe son origine, libère moins de carbone dans l'atmosphère que l'essence. Par exemple, Niven (2005) soutient que des carburants contenant 10% et 85% d'éthanol (E10 et E85) produisent moins de CO et de CO₂ que l'essence à la sortie du moteur. Le gouvernement canadien soutient que l'utilisation d'un mélange E10 produit à partir du maïs permet de réduire de 3 à 4% les émissions de GES par rapport à l'essence (Canada, 2007f). Si on cible l'analyse essentiellement sur ces émissions de carbone, l'éthanol ne fait relativement pas beaucoup mieux que l'essence. Cependant, pour une même distance parcourue – et non pour un même volume de carburant –, l'éthanol émet plus de carbone que l'essence, car la densité énergétique de l'éthanol est plus faible que celle de l'essence (Canada, 2003b). Il faut donc en brûler davantage afin de parcourir la même distance. Une consommation supérieure se traduira nécessairement par l'augmentation des émissions de carbone. Par conséquent, analysées en termes de distances parcourues, les émissions de CO₂ sont substantiellement du même ordre que celles de l'essence. Toutefois, compte tenu de son origine végétale, certains considèrent que l'éthanol possède d'emblée un crédit d'émission, émettant des molécules de carbone qui ont été préalablement captées et soustraites de l'atmosphère. Vu sous cet angle, l'éthanol n'émettrait pas ou très peu de carbone supplémentaire, principalement sous la forme de CO₂, dans l'atmosphère.

Cependant, la mesure du carbone émis ne suffit pas et bon nombre d'experts soulignent que la réalité exige de tenir compte des émissions produites par l'ensemble des étapes de production. Or,

quand on inclut l'ensemble des GES (CO_2 , CH_4 et N_2O) émis lors de l'ensemble du cycle de production et non les seules émissions de GES issues du tuyau d'échappement des automobiles, le bilan n'est plus du tout le même. Comme le souligne Hill (2007), la culture, le transport et la transformation du maïs, dans le cas de l'éthanol-maïs, deviennent alors d'importantes sources de CO_2 , CH_4 et N_2O , d'importants GES³³. Niven (2005) rapporte que les émissions de GES produites par un mélange E10 d'éthanol-maïs seraient de 1 à 5% moins importantes que l'essence conventionnelle.

Alors que selon l'étude de Wang, Sarick et Wu (1999) la production et la consommation d'un mélange E85 d'éthanol-maïs produiraient de 10 à 40% moins d'émissions que l'essence, et que selon les travaux de Zah *et al.* (2007) l'éthanol-maïs pur (E100) permettrait une réduction de 10% de ces émissions, alors que Hill *et al.* (2006) et Farrell *et al.* (2006) avancent que les réductions moyennes seraient respectivement de 12,4 et de 18% de GES, d'autres comme Chan, Hoffman et McInnis (2004), tout en soutenant que l'utilisation de l'éthanol contribuerait à réduire les émissions de GES. Toutefois, faute de technologies de conversion vraiment efficaces, ces réductions seraient insuffisantes pour permettre au Canada d'atteindre les cibles établies par le protocole de Kyoto.

Compte tenu des nombreuses étapes de production de l'éthanol-maïs, du champ au moteur, le choix d'intégrer ou non dans leur calcul certaines de ces étapes contribue sans doute à expliquer, à tout le moins en partie, ces différents bilans d'émission de GES. Les études ne considèrent pas de la même manière les émissions de CO_2 reliées aux transports et ainsi que celles de CH_4 et de N_2O reliées aux processus agricoles. Selon les études, on considère généralement les émissions liées à la combustion du carburant dans le moteur, à la production, au transport et à l'application des intrants chimiques (herbicides, insecticides et engrais), à la conversion et au transport de l'éthanol, au flux de carbone dans le sol ainsi qu'à la production, la combustion et la distribution de l'essence nécessaire à la machinerie. Certains, comme Farrell *et al.* (2006), vont jusqu'à attribuer un crédit d'émissions pour la réutilisation des résidus de fermentation du maïs pour l'alimentation animale.

³³ Mentionnons que, bien que le CH_4 et N_2O se retrouvent en très petite proportion dans l'atmosphère, leurs effets en tant que GES sont respectivement 21 à 23 et 296 à 310 fois plus importants que le CO_2 (Bellarby *et al.*, 2008; von Blotnitz et Curran, 2007).

Comme nous le verrons par la suite, le choix des critères mis à l'étude ou encore le fait d'attribuer, comme le font Farrell *et al.*, des crédits d'émission pour la réutilisation de certains sous-produits, devient un élément clé de la controverse des l'éthanol-maïs et de l'ensemble du phénomène des carburants végétaux. On pourrait également très certainement ajouter, comme le soulignent déjà certains auteurs (Hodge, 2003; Niven, 2005), que ces calculs ou le choix des paramètres d'analyse ne sont pas indifférents au rapport idéologique qu'entretient l'expert envers l'éthanol-maïs.

Le cas de l'agriculture

L'agriculture retient ici tout particulièrement l'attention. Certains auteurs font état du potentiel de séquestration du carbone atmosphérique par l'agriculture. Cole *et al.* (1997) rapportent que l'option des carburants végétaux fait partie du potentiel de réduction des émissions de GES du secteur agricole. Ceux-ci représenteraient 42% des efforts de réduction des émissions de GES par l'agriculture. Kim et Dale (2005a) avancent que la culture du maïs permettrait d'augmenter les concentrations de carbone organique dissous (COD) dans le sol. La séquestration du carbone dans le sol agricole sous cette forme « *is [an] important factor that should be taken into account when estimating the global warming impacts associated with bio-based industrial products such as fuel ethanol* » (p. 485). Ils rapportent également que les émissions nettes de GES de l'éthanol-maïs sont de -40 g en équivalent de CO₂ par Kg de maïs-grain produit et transformé, ce qui indique que la totalité du processus émettrait moins de GES. L'éthanol-maïs correspondrait alors en quelque sorte à un puits de carbone.

De la même manière, Adviento-Borbe *et al.* (2007) soutiennent que la culture intensive du maïs possède un grand potentiel de séquestration du carbone atmosphérique et d'azote sous forme minérale. Pour ces auteurs, de hauts rendements agricoles peuvent contribuer à minimiser les conséquences environnementales.

« Continuous maize systems had lower net [global warming potential] than maize-soybean systems, primarily due to greater crop residue amounts and the use of a deep tillage and residue management practice that favored the build-up of soil organic matter. The potential for GHG mitigation is further increased when corn is converted to bioethanol. » (p. 1986-1987)

La culture intensive du maïs pour produire de l'éthanol est présentée comme une mesure de réduction des GES. Cette étude ne compare toutefois que des cultures intensives entre elles et les auteurs cherchent en fait à optimiser la gestion agricole intensive par une meilleure exploitation du potentiel des rendements de ces cultures (Adviento-Borbe *et al.*, 2007), sans aucunement remettre en question la production agricole intensive et ses impacts.

Le développement du secteur agricole, par la mise en production de cultures énergétiques additionnelles et par l'augmentation subséquente des terres cultivées, accentuera sans aucun doute les impacts de l'agriculture sur le phénomène des changements climatiques, compte tenu que ce secteur correspond tout de même à un des plus grands émetteurs de GES (GIEC, 2007c ; Stern, 2007). Comme le souligne l'étude récente de Searchinger *et al.* (2008), l'intensification des cultures risque donc d'accroître encore plus les émissions de GES reliées à l'agriculture, tout particulièrement celles de CO₂ et de N₂O, ce qui aurait pour effet d'augmenter encore davantage les impacts de l'agriculture sur les changements climatiques.

L'éthanol-maïs, un émetteur net de GES!

En prenant en compte l'ensemble de ces éléments, David Pimentel et ses collaborateurs considèrent l'éthanol-maïs comme un émetteur net de GES (Pimentel, 2003; Pimentel et Patzek, 2005, 2007; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007). Selon ces auteurs, bien que l'éthanol-maïs posséderait un bilan d'émissions négatif, néanmoins sa production et son usage produiraient davantage de GES que la culture du maïs permettrait d'en séquestrer. Compte tenu qu'une unité d'énergie fournie par l'éthanol-maïs exige davantage d'énergie fossile, pour produire cette unité d'énergie, ils concluent que les émissions relatives à cette énergie fossile additionnelle alourdissent d'autant son bilan d'émission de GES (Pimentel, 2003). Patzek *et al.* (2005) ajoutent que « *there will be additional carbon dioxide, nitrous oxides, and sulfur oxide emissions from the fossil fuels used to produce the ethanol* » (p. 319). De plus, compte tenu des polluants atmosphériques relâchés durant le cycle de production de l'éthanol-maïs, l'impact se fait alors sentir sur l'ensemble des problèmes de pollution de l'air aux ÉU (Pimentel, Patzek et Cecil, 2007). Davantage de CO₂ seraient relâchés durant le processus de fermentation des sucres du maïs et par l'oxydation de la matière organique du sol (Pimentel et Patzek, 2007). En considérant alors l'ensemble de son cycle de vie, Patzek (2006a, 2006b) rapporte que l'éthanol-maïs E100 génère 50% plus d'émissions de CO₂ que la production et la consommation de l'essence n'en génère.

Patzek rapporte également que les émissions augmentent de 100% lorsqu'on nourrit les ruminants avec les résidus de fermentation du maïs – aussi nommés la drèche du maïs –, tel que l'indique l'étude de Farrell *et al.* (2007) en attribuant, comme nous l'avons déjà mentionné, un crédit d'émission pour ce geste. Selon Patzek, non seulement cette drèche, remise aux champs, prévient la détérioration des sols et atténue la dépendance de l'agriculture dans les engrais synthétiques, mais, donnée au bétail, génère d'importantes émissions de méthane, équivalent à près de trois tonnes de CO₂ par année.

D'autres, comme Hill *et al.* (2006), font remarquer que l'azote ajouté pour la fertilisation des sols contribue au relâchement vers l'atmosphère de N₂O produit par l'activité des microorganismes du sol. Les terres agricoles contribueraient à elles seules pour près de la moitié des flux de N₂O issus de l'activité humaine selon le GIEC (2001, p. 92). McSwiney et Robertson (2005) montrent une relation positive entre l'ajout d'engrais azotés au niveau d'une culture continue de maïs et l'augmentation des flux de N₂O du sol vers l'atmosphère. Les flux de N₂O sont fortement affectés par la quantité d'engrais azotés ajoutée : plus les rendements sont maximisés par l'ajout d'intrants azotés, plus les flux sont élevés. Selon l'intensité du traitement, de 2 à 7% de l'azote ajouté comme engrais serait ainsi relâché vers l'atmosphère sous forme de N₂O. Crutzen *et al.* (2007) estiment que les cultures agricoles conventionnelles, telles que le maïs, relâchent deux fois plus de N₂O que ce qui est généralement avancé. Le N₂O, est, rappelons-le, un gaz « trace » qui contribue de manière importante au phénomène de l'effet de serre (Bellarby *et al.*, 2008; von Blottnitz et Curran, 2007). Plus encore, les cultivars modernes de maïs sont les plantes alimentaires qui nécessitent le plus d'engrais azotés pour leur culture (Patzek *et al.*, 2005).

Si la demande énergétique croissante stimule la production de carburants végétaux et incite à augmenter les surfaces agricoles destinées aux cultures énergétiques, plusieurs études soulèvent que la conversion en nouvelles terres agricoles d'écosystèmes naturels ou actuellement dégradés fera augmenter davantage encore le bilan de GES négatif de l'éthanol-maïs. Ainsi, Fargione *et al.* (2008) estiment que bien que les carburants végétaux soient une source énergétique pouvant présenter, en théorie, un fort potentiel de réduction des émissions de GES, néanmoins, s'empressent-ils d'ajouter, en pratique, cela ne sera pas le cas, si on intensifie les cultures énergétiques au détriment des terres déjà occupées par l'agriculture alimentaire, mettant ainsi en péril la production des denrées, ou si on converti des écosystèmes naturels en nouvelles terres cultivées, mettant alors en péril les bénéfices associés à ces écosystèmes naturels. Ils estiment en

effet que la conversion de forêts, de prairies ou encore de tourbières aux EU comme au Brésil pour la production d'éthanol engendre *a biofuel carbon debt* (Fargione *et al.*, 2008), puisque de 17 à 420 fois plus de CO₂ serait alors émis comparativement à ce que la production de carburants végétaux pourrait permettre d'éviter.

Searchinger *et al.* (2008), évaluent pour leur part que le changement d'affectation des terres ferait doubler les émissions durant les trente prochaines années au lieu de diminuer les émissions de GES de 20%. La conversion d'écosystèmes naturels et de terres agricoles abandonnées pour la production d'éthanol-maïs engendrerait une dette de carbone qui prendrait respectivement 93 ans pour les écosystèmes naturels et 48 ans pour les terres agricoles abandonnées à rembourser, c'est-à-dire le temps nécessaire pour réintégrer le CO₂ relâché par ce processus de conversion des terres (Fargione *et al.*, 2008).

3.1.2 La valeur énergétique de l'éthanol-maïs : Un carburant vert?

Comme nous l'avons mentionné auparavant, la valeur énergétique de l'éthanol-maïs est un autre argument mis de l'avant pour en justifier la production. De nombreuses études, comparant ainsi la valeur énergétique de l'éthanol-maïs à celle de l'essence, prétendent que l'éthanol permet de réaliser un gain d'énergie par rapport aux carburants fossiles, ce qui représenterait alors un bénéfice environnemental certain.

Deux approches sont privilégiées pour déterminer la valeur énergétique de l'éthanol : le bilan énergétique net (BEN) et le rendement énergétique. Ces approches comparent l'énergie fournie par le carburant à l'énergie nécessaire à sa production. La production de carburants végétaux nécessite un apport certain en énergie afin de cultiver la ressource végétale, de la transporter et de la convertir en carburant. Comme nous pourrions de nouveau l'observer, les conclusions tirées de la littérature scientifique diffèrent, comme dans le cas des émissions de GES, selon les différents apports énergétiques pris en compte dans les estimations.

Les diverses approches énergétiques de l'éthanol-maïs, ainsi que les conclusions à première vue contradictoires qui en ressortent, rendent d'autant plus complexe la compréhension de la valeur énergétique réelle de l'éthanol-maïs. Elles font aussi de ce carburant l'énergie controversée que

l'on connaît aujourd'hui, présentant des gains pour certains tout en étant très énergivore pour d'autres, sans escamoter, par ailleurs, la question de l'utilisation de ressources alimentaires pour nourrir le parc automobile.

Le bilan énergétique net

Le BEN est la mesure de la valeur énergétique de l'éthanol-maïs (*output*) à laquelle est soustraite la quantité d'énergie nécessaire à sa production (*input*) (Shapouri, Duffield et Wang, 2002). Une valeur positive indiquera que l'éthanol fournit plus d'énergie qu'il en faut pour la produire ; une valeur négative signifiera l'inverse. Au tableau 3.1, nous présentons une brève synthèse de différentes valeurs de BEN identifiées dans la littérature, dont la grande variabilité sera observée plus en profondeur en p. 60. Calculées en joule (J) par mesure de poids ou de volume d'éthanol, ces valeurs montrent tout l'éventail de la variabilité des résultats obtenus selon le cadre et les méthodes d'analyse des différentes recherches. Nous avons aussi placé en figure A.1 et A.2 les figures-synthèse de valeur de BEN produites par Lavigne et Powers (2007), et Hill (2007).

Tableau 3.1. Différentes estimations de BEN de l'éthanol-maïs observées dans la littérature scientifique

Études	Bilan énergétique net J/Kg ou J/L
(Kim et Dale, 2005a)	de 13 400,00 à 21 500,00
(Lavigne et Powers, 2007)	5 900,00
(Lorenz et Morris, 1995) [□]	1 270,48
(Canada, 2000) [□]	1 238,79
(Wang, Sarick et Wu, 1999) *	934,51
(Shapouri, Duffield et Wang, 2002)	876,57
(Hill <i>et al.</i> , 2006)	813,46
(Marland et Turhollow, 1991) *	754,01
(Shapouri, Duffield et Graboski, 1995) *	672,56
(Ho, 1989) [□]	- 166,14
(Keeney et Deluca, 1992) *	- 350,46
(Pimentel, 2003)	- 680,78
(Pimentel, 2001) *	-1 393,98

* d'après Eaves et Eaves (2007)

□ d'après Shapouri, Duffield et Wang (2002)

Le rendement énergétique

La deuxième approche, la mesure du rendement énergétique, correspond au rapport établi entre l'*output* énergétique de l'éthanol et son *input* (Shapouri, Duffield et Wang, 2002). Selon le calcul, un rendement supérieur à 1 signifiera que l'éthanol-maïs produit plus d'énergie qu'il en faut pour la produire tandis qu'un rendement énergétique inférieur signifiera le contraire. Au tableau 3.2, nous avons réuni différents rendements énergétiques identifiés dans la littérature scientifique portant sur l'éthanol-maïs. Encore une fois, une grande variabilité de rendements énergétiques attribués à l'éthanol-maïs peut être observée.

Tableau 3.2 Différentes estimations de rendement énergétique de l'éthanol-maïs observées dans la littérature scientifique

Études	Rendement énergétique
(Shapouri, Duffield et Wang, 2002)	1,34
(von Blotnitz et Curran, 2007)	1,30
(Hammerschlag, 2006)	1,30
(Wessler, 2007)	1,26
(Hill <i>et al.</i> , 2006)	1,25
(McLaughlin et Walsh, 1998)	1,21
(Groom, Gray et Townsend, 2008)	1,10 à 1,25
(Pimentel et Patzek, 2005)	0,78
(Pimentel, 2003)	0,71
(Pimentel, Patzek et Cecil, 2007)	0,70

Les estimations de la mesure du BEN (tabl. 3.1) et de rendement énergétique (tabl. 3.2) font ressortir le désaccord des experts sur la question de l'éthanol-maïs. Ces deux approches comparant l'énergie fournie à l'énergie consommée par l'éthanol, il ne s'agit finalement que de manières différentes pour indiquer la même chose.

Un gain énergétique

Certains auteurs soutiennent que la valeur énergétique de l'éthanol-maïs serait positive (voir tabl. 3.1 et 3.2) et présenterait un gain énergétique, car l'énergie fournie serait supérieure aux énergies fossiles consommées pour produire cet éthanol.

L'étude du USDA (Shapouri, Duffield et Wang, 2002) estime que l'éthanol-maïs fournit 34% plus d'énergie qu'il n'en faut pour la produire, tout en soulignant au passage que l'augmentation prochaine des rendements agricoles et des technologies de conversion, ainsi que la diminution progressive de l'énergie nécessaire à la production de l'éthanol-maïs, permettront d'accroître encore davantage sa valeur énergétique. Il y aurait alors de quoi être optimiste!

Kim et Dale (2005a) attribuent également à l'éthanol-maïs une valeur énergétique positive : « *the available energy from ethanol is much higher than the input energy for producing ethanol* » (Kim et Dale, 2002, p. 243), prétendant, dans la foulée que même dans le pire des scénarios, l'utilisation de l'éthanol-maïs pour le transport domestique permettra de réduire de manière significative la consommation de pétrole.

Hill *et al.* (2006) et Hammerschlag (2006) estiment que l'éthanol-maïs fournit de 25 à 30% plus d'énergie que l'essence, bien que ce gain énergétique ne soit pas assez important pour faire de l'éthanol-maïs une option offrant de réels bénéfices environnementaux, ce qui serait le cas, laissent-ils entendre, de la prochaine génération de carburants végétaux.

Un bilan énergétique négatif

Pour d'autres, l'éthanol-maïs n'afficherait qu'un gain énergétique de 21% en comparaison à un gain de 343% pour une culture pérenne de *P. virgatum* (McLaughlin et Walsh, 1998). Nous soulignerons toutefois que la culture énergétique de cette herbacée, aux dépens du maïs, aurait des effets négatifs importants, notamment en faisant augmenter de manière importante les émissions de GES aux EU (Searchinger *et al.*, 2008).

De l'autre côté du prisme, d'autres experts nous présentent un éthanol-maïs au bilan négatif (*voir* tabl. 3.1 et 3.2), un carburant déficitaire consommant plus d'énergie qu'il n'en libère. Les auteurs Pimentel, Patzek et Cecil rapportent des valeurs énergétiques négatives pour l'éthanol issu du maïs (Pimentel, 1991, 2001 et 2003), où sa production va jusqu'à consommer de 29% (Pimentel et Patzek, 2005) à 43% (Pimentel, Patzek et Cecil, 2007) plus d'énergie fossile qu'il n'en fournit. Les différentes valeurs obtenues par ces mêmes auteurs s'expliquent par la considération, chez l'étude de 2007, d'un nouveau paramètre, celui de la distribution, et la mise à jour de certaines

valeurs, notamment de l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux, données datant de 1979.

D'une autre manière, Patzek *et al.* (2005) soutiennent qu'on perd « énergétiquement au change » en produisant de l'éthanol-maïs. Ils calculent que produire 2,66 litres d'éthanol (ce qui équivaldrait à 1,74 litre d'énergie en équivalent-essence) demande d'engager 4,9 litres d'énergie en équivalent-essence. Ceci correspond à la perte de 65% de l'énergie investie (3,2 litres en équivalent-essence).

Comment expliquer tant de variabilité?

Ces deux tableaux nous permettent d'observer le désaccord profond qu'entretiennent ces experts sur la valeur énergétique de l'éthanol-maïs (tabl. 3.1 et 3.2). Tant au niveau du BEN que du rendement énergétique, non seulement les résultats varient considérablement, mais sont souvent parfaitement contradictoires. D'un côté, certains chercheurs présentent un carburant au potentiel énergétique plus grand que ce qu'il en coûte à produire au plan énergétique alors que d'autres, Pimentel et Patzek en tête, présentent un carburant déficitaire au plan énergétique qui consomme plus d'énergie qu'il n'en fournit.

Comment expliquer de telles variations pour un même objet d'étude? Sans doute, les estimations obtenues sont intimement dépendantes des choix des apports et des contraintes énergétiques qui ont été pris en compte dans les calculs. La faible densité énergétique de l'éthanol, comparativement à celle de l'essence, ainsi que la décision d'attribuer des crédits énergétiques pour le recyclage de la drèche du maïs vers d'autres secteurs, pèsent certainement dans la balance.

La valeur énergétique de l'éthanol-maïs est premièrement dépendante du rendement de l'éthanol dans le moteur. Au même titre que le MMT et le MTBE, l'éthanol est un additif qui augmente l'efficacité de la combustion de l'essence³⁴. Comme nous l'avons par ailleurs déjà mentionné, l'éthanol possède une densité énergétique de 30% à 35% plus faible que celle de l'essence (Canada, 2003b ; Sheehan *et al.*, 2003 ; Vogel, 1996), ce qui veut dire que l'éthanol produit moins

d'énergie que l'essence pour un même volume consommé, augmentant conséquemment la consommation d'éthanol pour une même distance parcourue. Par exemple, l'essence (E0) produirait 30 100 BTU/litre de carburant tandis qu'un litre d'un mélange E10 fournirait 29 100 BTU (Canada, 2003b)³⁵. Sheehan *et al.* rapportent que sa densité est de 20MJ/L, comparativement à l'essence (32,2MJ/L), ce qui a pour effet d'augmenter la consommation d'essence pour une même distance parcourue. Vogel (1996) indique qu'une voiture familiale, au rendement de 8,5 km au litre, consomme 2000 litres d'essence pour une année moyenne de 17 000 km. Pour la même distance, 3078,62 litres d'éthanol sont nécessaires. Compte tenu de ces valeurs calorifiques, nous avons calculé que rouler à l'E10 augmenterait alors de 3,3% la consommation de carburant comparativement à l'E0. Plus la part d'éthanol sera grande dans le mélange, plus l'écart calorifique sera grand. En ce sens, un carburant E100 exigera un volume beaucoup plus important pour parcourir une distance équivalente. Patzek *et al.* (2005) rapportent notamment que « *its use amounts to burning the same amount of fuel twice to drive a car once [and] the fuel efficiency of those cars that burn corn ethanol is halved* ». Omettre de considérer l'effet de la densité énergétique de l'éthanol dans les calculs viendra certainement influencer positivement les valeurs de BEN ou de rendements énergétiques.

Également, Pimentel, Patzek et Cecil (2007) soulignent que ceux qui attribuent des valeurs énergétiques positives à l'éthanol omettent de nombreux apports énergétiques requis pour le produire, notamment l'énergie liée à la machinerie agricole et à l'équipement servant à la distillation. Pour eux, les coûts énergétiques associés aux intrants chimiques liés à la culture du maïs seraient sous-évalués : « *unrealistic, low energy costs were attributed to such inputs as nitrogen fertilizer, insecticides, and herbicides* » (p. 36). Ces auteurs soutiennent aussi que l'énergie associée à l'utilisation de la drèche du maïs serait excessivement surévaluée.

La plupart des auteurs octroient un crédit énergétique pour la réutilisation de la drèche du maïs. Comme nous l'avons vu, le USDOE (Tyson, 1993) estime que l'éthanol est un carburant propre parce qu'il libérerait plus d'énergie qu'il n'en faut pour le produire, soit 4,07 unités d'énergie

³⁴ Bien que ce ne soit pas notre propos ici, nous ne pouvons ignorer les impacts sociaux sanitaires et environnementaux des différents additifs, cette question ne pouvant se résumer aux seules considérations énergétiques.

³⁵ Un carburant E10 correspond à un mélange d'essence comprenant 10% d'éthanol.

liquide pour chaque unité d'énergie fossile consommée. Pour ainsi dire, il y aurait beaucoup plus d'énergie contenue au niveau de l'éthanol-maïs que d'énergie requise pour sa fabrication.

C'est également tout le processus de production de l'éthanol qui doit être mis à contribution afin de considérer l'énergie qu'il fournit potentiellement, de la plante à la réutilisation des déchets de production. Farrell *et al.* (2006) ainsi que Kim et Dale (2005a) sont de ceux qui soulignent l'importance de la drèche comme crédit énergétique. À l'instar de ces études, Patzek (2006a) considère également la réutilisation de la drèche du maïs en tant que crédit d'énergie, bien que ces crédits ne permettent pas à l'éthanol-maïs, selon cet auteur, d'être énergétiquement viable. S'appuyant sur les lois de la thermodynamique et prenant en compte l'énergie intégrée dans le processus de formation géologique du pétrole, l'auteur suggère que la valeur énergétique nette de l'éthanol-maïs est radicalement négative. Il estime que, selon que l'on considère ou non le crédit d'énergie relié à la drèche, c'est 3,9 et 6,2 litres d'éthanol-maïs qui sont nécessaires pour fournir le même travail qu'un litre d'essence. Le recyclage des sous-produits de fermentation du maïs n'est pas alors suffisant pour éviter d'entraîner un déficit énergétique.

3.1.3 L'éthanol-maïs en tant qu'énergie renouvelable

L'éthanol-maïs est également présenté comme une énergie renouvelable, contribuant ainsi à renforcer la représentation d'une solution viable que plusieurs se font. On associe communément à ce qui est renouvelable des bénéfices environnementaux auxquels on oppose les torts associés à l'utilisation de ressources non renouvelables, comme les énergies fossiles par exemple. Une énergie considérée renouvelable sera généralement étiquetée comme une option *environmentally friendly*.

De nombreux organismes font ainsi la promotion de l'éthanol-maïs en tant que carburant renouvelable. Parmi eux, on peut penser aux organismes pro-éthanol canadiens et états-unisens tels que l'ACCR (2007) et la RFA (2008b). Le PNUE (2008b) ainsi que les gouvernements du Canada (voir notamment : Canada, 2004, 2006b, 2007f; Forge, 2007) et des ÉU (voir notamment USSenate, 2007) classent l'éthanol-maïs en tant qu'énergie renouvelable.

Les auteurs mettent particulièrement de l'avant son origine végétale afin de justifier le caractère renouvelable de l'éthanol-maïs. De manière générale, on attribue aux variétés végétales, cultivées ou naturelles, l'appellation de ressources renouvelables. Sur son site, le gouvernement du Canada nous informe qu'une ressource renouvelable correspond à un type de ressources naturelles pouvant se régénérer à un taux comparable à celui de sa consommation, étant essentiellement inépuisables à travers une production continue (Canada, 2005a, 2007d).

Dans ce contexte, l'énergie fournie par l'éthanol-maïs semble être considérée comme un simple produit d'une énergie solaire emmagasinée par la plante par le processus de la photosynthèse. Le carbone ainsi stocké peut ensuite être converti en carburant par le processus de fermentation. De saison en saison, on sème et on récolte à nouveau en faisant appel à une ressource en apparence inépuisable. En ce sens, les carburants végétaux sont souvent considérés comme des énergies renouvelables.

Pourtant, la littérature nous fournit également certaines perspectives montrant que la production d'éthanol-maïs aboutit inévitablement à une diminution de la disponibilité des ressources à court et à long terme. Nombre d'auteurs questionnent ce caractère d'énergie prétendument renouvelable, en soulignant notamment que le modèle d'agriculture intensive de production du maïs et de culture destinées à la production d'autres carburants végétaux conduit à la surexploitation et à l'appauvrissement des sols (De Oliveira, Vaughan et Rykiel Jr., 2005; Giampietro, Ulgiati et Pimentel, 1997; Lal, 2005; Patzek *et al.*, 2005; Patzek, 2006a; Pimentel, 2003; Pimentel et Lal, 2007).

Une énergie renouvelable

Certes, plusieurs dont Chum, Overend et Phillips soulignaient dès 1993 que la montée des préoccupations environnementales impliquerait une transition vers la production de carburants « propres » issus de la filière des cultures énergétiques renouvelables. Rask soulignait également en 1998 le rôle important que doit jouer l'éthanol en tant que carburant renouvelable dans l'économie des EU. Pour Gray, Zhao et Emptage (2006), « *the most common renewable fuel today is ethanol derived from corn grain (starch) and sugar cane (sucrose)* ». Kim et Dale (2008) soutiennent également que l'éthanol est un carburant renouvelable. Toutefois, l'utilisation du

qualificatif « renouvelable », généralement présentée comme une évidence, est rarement accompagnée d'une description développée ou d'un propos argumenté.

D'autres auteurs comme Zah *et al.* (2007), considèrent que l'énergie issue de la biomasse, telle que l'éthanol-maïs, est une énergie renouvelable, car produite à partir de ressources renouvelables, au point de constituer « la source d'énergie renouvelable la plus répandue et [qu'elle peut] contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et notre dépendance face aux énergies fossiles » (p. I). Ils ajoutent toutefois que la culture et la transformation de ces ressources renouvelables en carburant peuvent « causer toute une série d'atteintes à l'environnement, allant de la « surfertilisation » et de l'acidification du sol agricole jusqu'à la perte de la diversité des espèces occasionnée par le brûlis des forêts pluviales » (p. I).

Uihlein, Ehrenberger et Schebek (2007) estiment pour leur part que l'éthanol-maïs, en tant qu'énergie renouvelable, a plus de conséquences sur l'environnement que ne saurait en avoir son équivalent en carburant fossile. Ainsi, « *even with an optimised production process for bioethanol, gasoline remains favourable, because overall environmental impacts of the renewable product are mainly due to the cultivation of the raw material* » (p. 11). En ce sens, l'utilisation d'une énergie renouvelable peut être associée à des torts environnementaux liés directement à sa production et à son utilisation. Alors que plusieurs présupposent encore que « renouvelable » est synonyme d'« *environmentally friendly* », d'autres considèrent désormais que l'éthanol-maïs bien qu'elle puisse être considérée comme énergie renouvelable a néanmoins des impacts environnementaux, notamment en relation avec sa culture intensive³⁶ susceptible de remettre en question la capacité des sols, à moyen et à long terme, à le produire.

³⁶ Cette culture intensive est largement accompagnée, aux États-Unis et au Canada par l'utilisation de maïs transgénique, ce qui mérite d'être pris en compte dans une analyse globale des impacts environnementaux, sociosanitaires et économiques, compte tenu des questions de flux génétique, d'impacts d'herbicides comme le Roundup Ready et d'insecticides d'un type particulier, comme dans les maïs transgéniques Bt, sans oublier la question des brevets sur les semences et leurs impacts. Comme cela relève indirectement de notre propos, nous renvoyons à certains auteurs comme Séralini et Benbrook. Séralini, Gille-Éric, 2003, *Génétiquement incorrect*, édition revue et actualisée. Paris. Flammarion. 321 p. et Benbrook, Charles. M., 2004, « Genetically Engineered Crops and Pesticide Use in the United States : The First Nine Years », *BioTech InfoNet. Technical Paper*, no 7, 38 p.

Une énergie non renouvelable

Pour Pimentel *et al.* (2002), l'éthanol-maïs n'aurait de renouvelable que la possibilité de cultiver le maïs dont elle est tirée, mais dans la mesure où sa production nécessite plus d'énergie fossile qu'elle n'en fournit, l'éthanol dérivé du maïs aux ÉU ne peut être considéré pour autant comme une source d'énergie renouvelable (Pimentel, 2003). Patzek (2006a), ainsi que Uihlein, Ehrenberger et Schebek (2007), considèrent que vu sa piètre valeur énergétique l'éthanol-maïs serait plus dommageable que les carburants fossiles. Estimant que la production d'éthanol-maïs « *is 2 – 4 times less favourable than production of gasoline from petroleum* » (p. 255) et que les impacts de sa production sur l'environnement constituent une « *ecological devastation wrought by the real-time industrial biofuel production must be severe* » (p. 268). Patzek, (2006a) estime que l'éthanol-maïs ne peut être considéré comme une ressource renouvelable.

En adoptant une perspective plus globale encore, Dukes (2003) estime qu'il faudrait consacrer 22% de la productivité primaire nette (PPN)³⁷ de la Terre, soit environ 50% de plus que celle qu'on utilise actuellement pour combler la totalité des besoins énergétiques reliés aux transports à partir des carburants végétaux. Une telle utilisation des ressources aurait de graves répercussions pour les besoins de toutes les autres espèces vivantes et notamment leurs besoins alimentaires. Remplacer les carburants fossiles – une production primaire du passé – par des carburants végétaux entraînerait une forte compétition inter-espèces pour l'utilisation de la même PPN terrestre, risquant tout particulièrement d'accélérer le déclin de la biodiversité que l'on observe actuellement et d'aggraver l'actuelle crise alimentaire.

Les chercheurs canadiens Berthiaume, Bouchard et Rosen (2001) proposent d'évaluer le caractère renouvelable de l'éthanol-maïs selon une approche « exergétique » et par la création d'un indicateur de « renouvelabilité »³⁸. Ces auteurs ont établi que l'éthanol-maïs, produit au Québec, ne peut en aucun cas être considéré comme une énergie renouvelable. « *A negative value for the renewability indicator is obtained for this case, indicating the process is non-renewable* » (p. 266). Selon ces auteurs la consommation de ressources considérées non renouvelables pour la

³⁷ La PPN équivaut à l'énergie photosynthétique potentielle transformée en biomasse par la vie terrestre, c'est-à-dire par les végétaux (Dukes, 2003).

production du maïs et sa conversion en éthanol (électricité, combustible fossile, intrants chimiques – phosphore, azote, potassium – , etc.) est telle que l'énergie générée est non renouvelable. L'indice de « renouvelabilité » alors calculé est de -4,77, en tenant compte de l'hypothèse selon laquelle l'énergie hydro-électrique (intégrée dans ce processus) est renouvelable, alors qu'aux EU, où l'énergie est produite principalement à partir du charbon, cet indice est plutôt de -37,7.

3.1.4 Un premier constat

Suite à l'analyse de la littérature scientifique sur la question, et à l'examen attentif des prémisses de ces travaux, il nous semble extrêmement difficile de continuer à prétendre que l'éthanol dérivé du maïs puisse être considéré comme une option énergétiquement viable.

Certes, deux visions s'opposent dans la communauté scientifique. Ainsi, Farrel *et al.*, Pacala et Socolow, ainsi que Koonin soutiennent notamment que rouler à l'éthanol permet de lutter contre les changements climatiques en réduisant les émissions de GES relatives au secteur du transport.

De leur côté, von Blottnitz et Curran, Farrell *et al.*, Hill *et al.*, Kim et Dale, Lavigne et Powers, et Shapouri, Duffield et Wang estiment que l'éthanol dérivé du maïs présente un gain énergétique par rapport au pétrole, alors que de nombreux auteurs considèrent d'emblée l'éthanol-maïs comme une énergie renouvelable.

Par ailleurs, d'autres experts, Pimentel et Patzek en tête, considèrent que ce carburant, qui émettrait plus de GES que l'essence, et dont la production nécessiterait globalement plus d'énergie que celle que sa combustion n'en fournit, n'aurait de renouvelable que le maïs dont il est tiré. Ce qui distingue leurs analyses des premières favorables à l'éthanol-maïs, c'est qu'elles englobent un plus grand nombre de facteurs, tant sur le plan des calculs d'émissions de GES que des estimations de valeur énergétique, reflétant ainsi beaucoup mieux un examen global et intégré de l'éthanol issu du maïs.

³⁸ L'indicateur de renouvelabilité qu'ils ont établi se comprend comme le rapport entre le *travail* fourni par le carburant, auquel on doit soustraire le *travail* dépensé afin de compenser les ressources non renouvelables consommées pour sa production, et ce même *travail* fourni.

Pris dans leur ensemble, les trois critères ici examinés (émissions de GES, valeur énergétique et caractère renouvelable) ne permettent certainement pas de tracer un portrait très positif de l'éthanol-maïs. Notamment, les estimations optimistes sont souvent basées sur la présupposition d'un développement technoscientifique à venir, ce qui sur le plan de la rigueur scientifique, n'est sans doute pas un argument des plus solides. Il y a aussi le cas de la drèche du maïs qui est parfois utilisée par certains en tant que crédit de GES, sous la forme de nourriture pour les animaux, parfois en tant que crédit énergétique, lorsqu'elle est brûlée pour en tirer une énergie réutilisée pour la production d'éthanol. On pourrait également souligner le caractère renouvelable des carburants végétaux qui semble être fonction d'un présupposé positif envers une énergie issue du monde végétal sans questionner la complexité d'un tel concept.

Pour le moment néanmoins, il ne nous semble possible que de constater le flou entourant cette forme d'énergie. Pour les mêmes critères utilisés, différentes conclusions sont tirées. En ce sens, il nous semble que les conclusions dépendent davantage des facteurs que les auteurs ont choisi ou non d'intégrer à leurs calculs, et ainsi davantage, comme le soulignent également Hodge (2003) et Niven (2005), du rapport idéologique que l'auteur entretient avec l'éthanol-maïs que des résultats comme tels. Comme nous l'aborderons plus loin, ce rapport idéologique est pour plusieurs largement tributaire du potentiel marchand de l'éthanol-maïs et des autres carburants végétaux, tout particulièrement pour l'industrie agro-alimentaire (e.g. Monsanto, Gargill, Dupont) et pour l'industrie pétrolière (e.g. BP, Shell) qui investissent de manière très importante le développement de ces filières énergétiques.

À la lumière de cet examen attentif de la littérature, force est de constater qu'il nous est impossible d'affirmer que l'éthanol-maïs puisse représenter une option viable, même partielle aux carburants fossiles. Les critères que nous avons choisis d'observer dans cette partie sont ceux qui sont le plus souvent utilisés dans la littérature afin de légitimer la filière de l'éthanol-maïs. Pourtant, d'autres critères doivent aussi être considérés afin d'apprécier pleinement la viabilité de cette option énergétique. Comme le soulignent Scharlemann et Laurance (2008), l'appréciation de la pertinence des carburants végétaux dépasse de loin la seule prise en compte des émissions de GES et de leur valeur énergétique.

Dans la prochaine section, nous tenterons d'approfondir la question du cas complexe de la viabilité de l'éthanol-maïs en tant qu'alternative, même partielle, aux carburants fossiles, tout

particulièrement à propos de ses impacts socio-environnementaux de l'éthanol-maïs. Pour ce faire, nous examinerons les impacts de la production et des usages de l'éthanol-maïs sur les sols agricoles, la qualité des eaux, l'intégrité de la biodiversité, la qualité de l'air et la santé humaine. Nous verrons également le cas de l'éthanol-maïs à travers les enjeux de sécurité énergétique et de développement économique, où certains le considèrent comme un élément important d'une stratégie énergétique et économique nationale, ainsi qu'à travers l'importante crise alimentaire qui se manifeste actuellement.

3.2 LES CONSÉQUENCES SOCIO-ENVIRONNEMENTALES DE LA PRODUCTION D'ÉTHANOL-MAÏS

Comme nous venons de le voir, les conclusions relatives au potentiel de réduction des émissions de GES, de la valeur énergétique et du caractère renouvelable de l'éthanol-maïs divergent fortement selon les experts et plus précisément selon leurs perspectives, soit plus étroites et sectorielles ou au contraire plus globales et intégrées conduisant à adopter des paramètres et des méthodologies fort différents. Si, sur ces trois éléments, certains concluent donc que l'éthanol-maïs représente plus de bénéfices que d'impacts alors que d'autres soutiennent le contraire, on remarque que d'autres chercheurs élargissent leur analyse pour y inclure les impacts de l'éthanol maïs sur l'environnement et sur l'ensemble de la société et ils en dégagent alors un bilan négatif.

La présente section s'appuie sur une revue de la littérature des impacts de la production de l'éthanol-maïs, afin d'évaluer dans quelle mesure ce carburant végétal de 1^{ère} génération peut être considéré comme une option viable dans le contexte actuel et quels sont les principaux enjeux liés à sa production et à ses usages. Nous mettrons d'abord de l'avant les principales conséquences de la production d'éthanol-maïs sur l'environnement³⁹, notamment les effets de l'agriculture intensive sur la qualité des sols et des eaux ainsi que la pression sur les écosystèmes et sur la biodiversité que provoque l'intensification des cultures énergétiques. Ensuite, notre regard portera sur les principaux enjeux socio-économiques rattachés aux grandes cultures d'éthanol-maïs, particulièrement en matière de sécurité énergétique, de développement régional et de sécurité alimentaire.

³⁹ À ce propos, Niven (2005) nous fournit une représentation schématique des principaux impacts de la production et de l'usage de l'éthanol sur l'environnement (*voir* fig. A.3).

3.2.1 L'agriculture intensive, l'érosion et la dégradation des sols

La production de maïs destiné à la fabrication de l'éthanol à l'échelle commerciale repose essentiellement sur de grandes monocultures intensives nécessaires pour assurer un approvisionnement suffisant et à faible coût de la matière première (Patzek *et al.*, 2005; Pimentel et Lal, 2007). Toutefois, de telles monocultures intensives, qui très souvent dégradent les sols, contaminent les eaux, amplifient les problèmes de contrôles de maladies et de ravageurs et tendent à faire décroître les rendements agricoles (Giampietro, Ulgiati et Pimentel, 1997), ont des impacts majeurs, à court et à long terme, sur l'agriculture.

Les sols, s'appauvrissant de manière substantielle, sont les premiers à subir les conséquences d'une agriculture intensive. Comme plusieurs le reconnaissent, l'érosion est un des impacts majeurs liés à l'agriculture intensive moderne sous la forme de monocultures (Giampietro, Ulgiati et Pimentel, 1997; Horrigan, Lawrence et Walker, 2002; Pimentel, 2006; Pimentel et Lal, 2007). Dans le cas de la production du maïs, il s'agit de la culture qui génère le plus d'érosion (Hill *et al.*, 2006). Aux ÉU, elle provoque une érosion de 10 à 40 fois plus rapide que la capacité naturelle des sols à se régénérer par le recyclage de la biomasse végétale (De Oliveira, Vaughan et Rykiel Jr., 2005; Pimentel, 2006; Pimentel et Pimentel, 1996). L'érosion, en diminuant les concentrations de matières organiques, affecte négativement la productivité des sols et réduit la biomasse produite (Pimentel, 2006). En appauvrissant les sols, l'érosion diminue d'autant plus les rendements agricoles qu'elle oblige l'ajout supplémentaire d'engrais afin de les maintenir.

Pimentel *et al.* (1995) rapportent que la transition vers la culture exclusive du maïs pour l'éthanol a fait augmenter l'érosion annuelle de 6,7 à 48,7 tonnes par hectare, en provoquant l'abandon de méthodes agricoles qui aident à la préservation des sols, comme la rotation des cultures. Ce phénomène d'érosion est encore davantage accéléré par l'utilisation de la drèche du maïs. Celle-ci n'étant pas retournée au sol comme le sont souvent les résidus de cultures alimentaires (Lal, 2005), davantage d'engrais sont nécessaires pour pallier ce manque (Patzek, 2006a).

Afin de répondre aux nouveaux objectifs de production nationale, l'augmentation des superficies cultivées de maïs ne fera qu'augmenter davantage l'application d'herbicides, d'insecticides et d'engrais azotés, accélérant ainsi le phénomène d'érosion (Pimentel, 2003). Le déclin de la biodiversité au sein des écosystèmes agricoles, résultant de l'intensification des superficies

destinées à la culture énergétique du maïs, risque d'accroître la vulnérabilité des cultures aux maladies et aux ravageurs. De Oliveira, Vaughan et Rykiel Jr. (2005) avancent que la production de carburants végétaux à l'échelle commerciale diminuera les rendements dus à l'augmentation des problématiques liées aux ravageurs, aux maladies et à la dégradation des sols.

De plus, les cultivars modernes de maïs sont considérés comme les variétés végétales cultivées les plus exigeantes. Plus que toutes autres cultures, le maïs nécessite ainsi l'ajout d'importantes quantités d'engrais azotés et de pesticides (Hill *et al.*, 2006; Patzek *et al.*, 2005; Pimentel, 2003). Comme il a été souligné précédemment, ces engrais azotés sont responsables d'émissions de N_2O dans l'atmosphère (Adviento-Borbe *et al.*, 2007; McSwiney et Robertson, 2005), un important GES. Ils provoquent aussi la libération de NO_x (Niven, 2005). Les pesticides, quant à eux, ont des conséquences certaines sur la biodiversité des écosystèmes et sur la santé humaine. Hill *et al.* (2006) ont montré que les pesticides, sans mentionner du moins dans cet article lesquels, utilisés pour la culture du maïs causeraient plus de torts à l'environnement et y seraient plus persistants que ceux utilisés pour d'autres cultures.

Comme le soutiennent Altieri et Bravo (2007), les objectifs de production d'éthanol proposés par les gouvernements canadien et états-unien risquent d'encourager une transition encore plus importante vers des méthodes agricoles intensives et industrielles. D'ailleurs, il est à prévoir que l'augmentation du prix du grain et des subsides gouvernementaux liés à la production d'éthanol encouragera cette transition. On peut croire également que ces objectifs élevés de production entraîneront davantage de producteurs à s'engager dans ces monocultures énergétiques intensives. La loi C-33 au Canada, qui pourrait imposer un seuil minimal de 5% d'éthanol dans l'essence (Banks, 2008), pousse en ce sens. Le maïs étant la seule source de biomasse actuellement disponible en assez grand volume pour supporter une production commerciale, cela contribuera sans doute à augmenter les superficies destinées à cette culture, avec les conséquences sur les sols que l'on connaît.

Au Québec, bien que la production d'éthanol-maïs soit limitée aux 120 millions de litres annuellement produits à l'usine de Varennes, on observe que le maïs destiné à la production de l'éthanol est produit sensiblement dans les mêmes conditions que celui destiné au secteur de

l'alimentation⁴⁰. Dans la copie d'une lettre adressée au Ministère de l'Environnement du Québec, le responsable du projet de distillerie à Varennes, Les Alcools de Commerce inc. (ACI), fait état des engagements auxquels le groupe souscrit quant à leur approvisionnement en maïs-grain en provenance du Québec (ACI, 2003). ACI s'engage ainsi à respecter les différentes lois et les différents règlements déjà en vigueur en ce qui a trait à la culture du maïs au Québec, alors que les fournisseurs membres de Pro-Éthanol inc.⁴¹ devront respecter le *Règlement sur les exploitations agricoles*, la *Politique de protection des rives et des plaines inondables*, la *Loi sur les pesticides*⁴². Pour les fournisseurs non membres de cette organisation, rien n'est indiqué. L'augmentation des débouchés pour la production du maïs, et l'intensification subséquente de cette culture, n'est donc pas l'objet d'une réglementation plus stricte même s'il s'agit de la culture végétale la plus exigeante.

3.2.2 L'eutrophisation, la qualité des eaux et les quantités d'eau requises

La culture du maïs a également des impacts sur la qualité des eaux. Les intrants chimiques agricoles, l'azote, le phosphore et les pesticides polluent les eaux en ruisselant des champs (Pimentel, Patzek et Cecil, 2007). L'érosion et le lessivage des champs cultivés chargent les cours d'eau avoisinants de sédiments et de polluants agricoles. Ces éléments contaminent ainsi les différentes eaux de surfaces, souterraines et côtières, en augmentant les teneurs en nitrate, en nitrite et en pesticides (e.g. glyphosate) (Hill *et al.*, 2006; Kim et Dale, 2008; Lemire, 2008), menant à l'eutrophisation des écosystèmes aquatiques et à l'augmentation des périodes d'hypoxie, à une perte de biodiversité aquatique et à la contamination de l'eau potable. Pimentel (2003) souligne que « *in some Western irrigated corn acreage, ground water is being mined 25% faster than the natural recharge of its aquifer* » (p. 130). En Arizona, l'eau des nappes souterraines est également puisée dix fois plus rapidement, afin d'irriguer les champs de maïs, que la capacité naturelle de renouvellement des aquifères (Pimentel *et al.*, 2004).

⁴⁰ En novembre 2007, le ministre du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Claude Béchar, a indiqué que l'usine de Varennes serait la première et l'unique usine d'éthanol-maïs au Québec (Gendron et Thibault, 2007).

⁴¹ Pro-Éthanol inc est une organisation de fournisseurs de maïs pour l'usine de Varennes.

⁴² De même que le *Règlement sur les permis et les certificats pour la vente et l'utilisation de pesticides*, le *Code de gestion des pesticides*, le *Règlement modifiant le Règlement sur les permis et certificats pour la vente et l'utilisation des pesticides* et la *Loi fédérale sur les produits antiparasitaires*.

Une étude canado-états-unienne indique que l'augmentation de la culture du maïs menacerait l'écosystème entier du golfe du Mexique (Donner et Kucharik, 2008). L'intensification de la culture, nécessaire afin d'atteindre les objectifs fixés de production d'environ 57 milliards de litres d'éthanol-maïs d'ici 2022 (USSenate, 2007), menace d'accroître de 10 à 34% le flot d'azote inorganique dissout dans les affluents du golfe du Mexique (notamment dans le fleuve Mississippi). Les engrais azotés ajoutés au champ pour la culture du maïs dans les États de la *U.S. Corn Belt* (notamment l'Illinois, l'Iowa, Nebraska et le Wisconsin), lorsque lessivés des sols agricoles, se déversent dans le Mississippi par ses affluents pour ensuite se déverser dans le golfe du Mexique. Fortement issu de l'agriculture, l'azote retrouvé dans les cours d'eau est la cause principale du phénomène d'hypoxie des eaux de fond qui se développe chaque année dans la partie nord du golfe. Les nutriments d'origines agricoles, l'azote en tête de liste, entraînent une forte eutrophisation. Ce phénomène provoque une diminution de la concentration d'oxygène dissous dans l'eau des zones côtières, entraînant la mort par asphyxie des organismes benthiques et, par conséquent, le déclin des stocks de poissons. L'augmentation de la culture du maïs aux ÉU – associée à une hausse de l'utilisation d'engrais et de pesticides – et de l'érosion des sols annonce donc une augmentation logique de la charge en contaminants et en sédiments des cours d'eau et des eaux souterraines. L'expansion de la culture de maïs sur des terres récemment converties, dites marginales, dégradées, au sol moins fertile pour des cultures alimentaires, ou encore des forêts nouvellement coupées, augmentera d'autant plus cette charge (NAS, 2008).

Il faut également souligner que d'importantes quantités d'eau sont requises pour produire de l'éthanol à partir du maïs. À elle seule, la culture d'un hectare de maïs entraîne, durant la saison de croissance, la perte d'environ 4 millions de litres d'eau par transpiration (De Oliveira, Vaughan et Rykiel Jr., 2005) et de deux millions de litres supplémentaires par évapotranspiration directement du sol pendant la même période. Un hectare de maïs qui, selon les auteurs, permet de produire annuellement de 3000 à 3500 litres d'éthanol (Hill *et al.*, 2006; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007) exigerait donc au minimum 6 millions de litres d'eau ! Comme le souligne Schnoor (2007), c'est alors environ 2000 litres d'eau qui sont nécessaires afin d'irriguer le maïs nécessaire à la production d'un seul litre d'éthanol !

En raffinerie, la production de ce même litre génère 3 à 5 (Schnoor, 2007), 12 (Pimentel, 2003), voire jusqu'à 13 litres d'eaux usées (Anslow, 2007) qui doivent être décontaminées par la suite à travers un processus très énergivore (Berthiaume, Bouchard et Rosen, 2001; Pimentel, Patzck et

Cecil, 2007). Anslow (2007) souligne que « *this waste water contains dead yeast and small amounts of ethanol, and has what is known as a Biological Oxygen Demand (BOD) - which means that the effluent competes with various other organisms in the water for available oxygen* » (p. 36).

Berndes (2002) indique que l'intensification des superficies destinées à la culture énergétique du maïs fera potentiellement augmenter le phénomène d'évapotranspiration d'autant que celui qui se produit sur l'ensemble des terres agricoles actuellement exploitées. Cela mènera très certainement à l'augmentation de l'occurrence de stress hydrique et de sécheresse locale dans certaines régions du monde. Gergely (2007) rapporte notamment le cas de la Hongrie où la production nationale d'éthanol-maïs et la combustion de la drèche (électricité) auraient contribué de manière importante à la sévère sécheresse qui a sévi dans le pays en 2007.

3.2.3 Des conséquences sur la biodiversité

Selon la Convention pour la diversité biologique (CBD, 2007), la production et l'usage de carburants végétaux mettent une forte pression sur la biodiversité. L'augmentation des superficies destinées à ces cultures a pour conséquences de diminuer, de fragmenter et de dégrader les habitats naturels, leur biodiversité et les services environnementaux que celle-ci fournit. L'intensification de la production se fait aussi au détriment des cultures traditionnelles ou alternatives, mettant également en péril les services environnementaux rendus par la faune et la flore des écosystèmes agricoles. L'attrait de la culture du maïs pour la production d'éthanol a des conséquences certaines sur la biodiversité, particulièrement par l'intensification des cultures, la surtaxation des sols, la maximisation des rendements, la surutilisation de pesticides et d'engrais et la mise en œuvre de nouvelles approches issues des biotechnologies, comme les OGM.

Selon De Oliveira, Vaughan et Rykiel Jr. (2005), la production d'éthanol fera perdre des habitats naturels au profit de l'expansion des monocultures énergétiques « *as a consequence, fauna and flora are lost, thereby reducing biological diversity* » (p. 599). On peut déjà observer ce phénomène par la mise en exploitation de terres déjà fragilisées ou de zones actuellement boisées (OCDE, 2007). D'autres auteurs soulignent également que de telles cultures intensives pour la production d'éthanol-maïs contribueront à diminuer des aires naturelles, des forêts naturelles et

semi-naturelles, des prairies et des zones humides (Giampietro, Ulgiati et Pimentel, 1997; Groom, Gray et Townsend, 2008; Niven, 2005; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007; Righelato et Spracklen, 2007). C'est tout le secteur agricole qui, comme le soulignent Vandelac et Beaudoin (2007), sera bouleversé, faisant exploser les prix à la consommation. L'augmentation rapide du prix des denrées, déjà observable comme nous le verrons plus loin, intensifiera très certainement la compétition mettant en jeu la terre et les forêts.

De plus, le phénomène d'érosion a des impacts sur la biodiversité des écosystèmes agricoles, tout particulièrement sur la faune des sols. En diminuant la productivité des sols et la biomasse produite, Pimentel (2006) rapporte que l'érosion affecte profondément la diversité végétale, animale et microbienne de tout l'écosystème. Les phénomènes d'eutrophisation et d'hypoxie, rapportés par Donner et Kucharik (2008), ont des effets certains sur la faune et la flore des écosystèmes aquatiques (NAS, 2008).

On pourrait aussi mentionner les effets des pesticides sur la faune, dus notamment à leur persistance dans l'environnement et aux effets de synergie qui peuvent en résulter. La culture du maïs nécessite l'utilisation d'environ 36% d'atrazine, 23% d'acetochlore, 16% de metalochlore et 8% de glyphosate (Hill, 2007). Entre autres, l'atrazine est reconnue comme un puissant perturbateur endocrinien et déprimeur du système immunitaire (Gerard et Poullain, 2005 Russo et Lagadic, 2004). Munoz et Roses (2000) ont également montré que l'atrazine se bioaccumulait chez certaines espèces de *Pulmonata*, faisant ressortir le risque de transfert de ce toxique tout au long de la chaîne alimentaire.

En outre, soulignons que le maïs (~35 millions d'hectares), avec le soya (~60 millions d'hectares) et le canola (~5 millions d'hectares), sont actuellement les variétés d'OGM alimentaire les plus cultivées dans le monde (ISAAA, 2007). Selon les dernières données de l'*International Service for the Acquisition of Agribiotech Applications*, 12% de surfaces agricoles supplémentaires ont été destinées à la culture d'OGM entre 2006 et 2007 de par la planète, c'est-à-dire 12,3 millions d'hectares supplémentaires, ou encore 114,3 millions d'hectares OGM mondialement cultivés. 44% du maïs cultivé au Québec en 2005 était OGM (Canada, 2005b). En 2006, les ÉU ont planté 35% des 33,1 millions d'hectares de culture de maïs en maïs-Bt OGM (Rosi-Marshall *et al.*, 2007).

Dans ce contexte énergétique, la promotion de cette forme de culture vise à faire changer notre perception générale des OGM, les faisant paraître aujourd'hui à la fois comme une solution à nos besoins énergétiques en tant que maillon inévitable de l'expansion de la filière des carburants végétaux de 1^{ère} génération, à la fois permettant d'éviter le conflit culture alimentaire contre culture énergétique, tout ça reposant sur l'argumentaire avancé, mais nullement certain, de l'augmentation des rendements agricoles (Borlaug, 2007).

Bien que l'étude des effets à long terme des OGM dans l'environnement ait paradoxalement été très peu encouragée par les pouvoirs publics et que les études, comme le souligne (Hill, 2007), soient peu nombreuses, les premiers résultats méritent néanmoins d'être examinés avec sérieux. Ainsi, Rosi-Marshall *et al.* (2007) rapportent que la toxine exprimée par le gène modifié peut se retrouver dans les écosystèmes aquatiques avoisinants aux cultures. Cette toxine réduirait la croissance et augmenterait le taux de mortalité d'insectes aquatiques à la base de la chaîne alimentaire. Douville *et al.* (2007) ont aussi montré que le transgène du Maïs-Bt persiste dans les écosystèmes aquatiques. Vandelac et Beaudoin (2007) soulignent que les cultures OGM ont pour effet d'augmenter l'usage de pesticides, comme en témoigne l'étude américaine de Charles M. Benbrook (2004) qui montre que, à l'exception des 3 premières années de commercialisations de variétés OGM, l'usage de pesticides, plus particulièrement d'herbicides, continu de croître avec la mise en culture de plantes pesticides. En outre, la plupart des OGM actuellement sur le marché sont disséminés dans la nature par pollution génétique et en viennent à contaminer l'inventaire des autres variétés végétales cultivées, comme on l'a vu dans plusieurs régions du Canada avec le canola et au Mexique avec le maïs (Darier et Martel, 2005; Robin, 2008 Vandelac et Beaudoin, 2007).

Outre ses impacts entrevus de dégradation des sols et des eaux déjà évoquées et tous ses effets de pollution agricole et industrielle, soulignons que la culture du maïs, son transport, son raffinage ainsi que la combustion de l'éthanol (NAS, 2008; WI, 2006) contribuent également à l'échelle régionale aux changements climatiques. Les rejets d'eaux usées des raffineries, riches en nutriments, peuvent aussi avoir des effets importants sur les écosystèmes aquatiques et leur eutrophisation (Anslow, 2007).

3.2.4 La qualité de l'air et la santé humaine

Différentes études montrent également les effets négatifs de l'usage de l'éthanol-maïs sur la qualité de l'air. Patzek *et al.* (2005) prétendent pour leur part que les émissions produites par l'éthanol-maïs sont équivalentes à celles de l'essence. Les émissions qui résultent de la fabrication de l'éthanol élimineraient, selon eux, le crédit induit par la séquestration du carbone par le maïs lors de sa culture. Ils ajoutent que le PAN et le NO₂ sont aussi des gaz responsables des pluies acides. Le PAN et l'O₃ sont phytotoxiques : ils diminuent donc le phénomène de la photosynthèse dans le monde végétal. Une diminution de la photosynthèse réduirait donc d'autant plus la séquestration du CO₂ par les plantes, qu'elle ferait augmenter par conséquent l'ensemble des GES dans l'atmosphère et leurs effets sur les changements climatiques, selon ces auteurs.

D'autres études rapportent que sa combustion augmente la charge atmosphérique en acétaldéhyde, en formaldéhyde, en nitrate de peroxyacétyl (PAN), en O₃ et en NO₂. L'acétaldéhyde et le formaldéhyde sont des composés organiques volatils précurseurs de l'O₃ lorsqu'ils réagissent avec le NO₂ (Bell *et al.*, 2007), l'O₃ elle-même responsable de la formation de smog photochimique. Niven (2005) rapporte que la combustion d'un mélange E10 augmente les émissions de NO_x et d'acétaldéhyde (de 100 à 200%) par rapport à l'essence. Patzek *et al.* (2005) rapportent aussi que l'utilisation de l'éthanol comme additif à l'essence pollue sérieusement l'air. « *The reactivity of the combined exhaust and evaporative emissions using the ethanol-blended reformulated gasoline is estimated to be about 17% larger than those using the MTBE-blended reformulated gasoline* » (p. 325). L'éthanol-maïs réduirait les émissions de CO mais augmenterait les émissions de NO_x, d'acétaldéhyde, de PAN.

Une récente étude de Jacobson (2007) avance que l'usage d'un mélange E85 ferait augmenter les émissions de CO, de formaldéhyde, d'acétaldéhyde, d'éthanol, de PAN et d'O₃ par rapport à l'usage de l'essence conventionnelle. Ces teneurs en polluants atmosphériques feraient alors augmenter les cas de mortalité, d'hospitalisation et d'asthme relativement aux émissions d'O₃. L'usage de ce mélange, selon ce chercheur, serait susceptible de provoquer une augmentation de la mortalité, de 9% à Los Angeles et de 4% dans l'ensemble des États-Unis en 2020. Selon l'auteur, l'usage de l'éthanol-maïs, tel que projeté par les gouvernements, serait encore plus dangereux, d'un point de vue des émissions, que celui de l'essence conventionnelle.

La production et l'usage de l'éthanol-maïs augmentent les émissions de NO_x, à partir des sols lors de la culture du maïs et lors du transport et de la distribution de l'éthanol par une évaporation (Hodge, 2002; Kim et Dale, 2008). Toutefois, que l'éthanol soit fabriqué à partir de cultures du maïs ou à partir d'autres sources, les émissions liées à sa combustion seront les mêmes, quelle que soit l'origine de l'éthanol, puisqu'il s'agit toujours du même composé.

L'ensemble des polluants énumérés ci-dessus, et notamment nombre de pesticides, ont des conséquences néfastes sur la santé humaine (Lemire, 2008). Plusieurs d'entre eux peuvent notamment agir en tant que perturbateurs endocriniens et peuvent causer des troubles de reproduction. Différents problèmes génotoxiques, neurotoxiques, dermatologiques et carcinogéniques leur sont aussi associés (Richard *et al.*, 2005; Sanborn *et al.*, 2004).

En ce qui à trait aux polluants atmosphériques, notons des effets en termes d'irritation oculaire et des voies respiratoires (PAN), de risques de cancer, d'occurrence d'asthme, voire d'augmentation des taux de mortalité associés au période de smog photochimique urbain (Jacobson, 2007). Santé Canada (Canada, 2007h) met en garde contre l'usage du mélange E10 et de l'augmentation potentielle de l'exposition aux émissions d'acétaldéhyde, formaldéhyde, de PAN et d'éthanol sur la santé de la population en général. L'organisme gouvernemental souligne les dangers encourus par des groupes à risque comme les femmes enceintes, les individus ALDH déficients et ceux prenant une médication pour traiter les troubles d'alcoolisme.

3.2.5 Un enjeu de sécurité énergétique

En plus de représenter pour certains une voie alternative et partielle aux carburants fossiles, l'éthanol-maïs est souvent présenté, notamment aux États-Unis, comme un gage de sécurité énergétique nationale et donc comme une option à privilégier et à promouvoir (EAA, 2005; Farrell *et al.*, 2006; Kerr et Service, 2005; Shapouri, Duffield et Graboski, 1995; Shapouri, Duffield et Wang, 2002; USSenate, 2007; Wirth, Gray et Podesta, 2003). L'AIE (2004) cible d'ailleurs cet élément comme l'un des principaux objectifs de développement des carburants végétaux. C'est également ce que proposait le Président Bush dans son dernier discours sur l'état de l'Union (Bush, 2007b), allant jusqu'à faire des carburants végétaux, l'éthanol-maïs en tête de liste, un facteur de stabilité géopolitique. Au Canada, la loi C-33 présente également

l'accroissement de la production de carburants végétaux comme facteur permettant au Canada de se libérer de la dépendance à l'égard du pétrole étranger (Banks, 2008), alors qu'au même moment, le Canada exporte une bonne partie de son pétrole des sables bitumineux vers les ÉU.

L'argument de la sécurité énergétique a d'autant plus de poids aux ÉU que leur dépendance envers le pétrole étranger est très marquée. Très grands consommateurs de pétrole, importé pour plus des deux tiers, ils sont à la merci de leurs sources d'approvisionnement, dont la moitié provient de régions qu'ils considèrent comme instables, voire conflictuelles (pays du Golf Persique, Venezuela, Nigeria, Angola, Algérie et Gabon) (Tyner et Taheripour, 2007). En ce sens, Wyman souligne que (2001) « *the development of alternative sources of energy became a national priority in the early 1970s in response to the Libyan and later Arab oil embargoes* » (p. 7). Les ÉU favorisèrent donc, dès les années 1980, la filière de l'éthanol-maïs, par une série d'interventions (subventions, incitatifs financiers et autres formes de soutien gouvernemental), au point où éthanol et maïs devinrent presque synonymes. Néanmoins, malgré la promotion de l'éthanol-maïs, une filière possédant déjà une infrastructure industrielle et s'appuyant sur une ressource cultivée localement en volume suffisant pour permettre une production à une échelle commerciale, les ÉU demeurent toujours tout aussi dépendants du pétrole étranger.

Dans le cas de l'éthanol-maïs, rien ne permet de prétendre qu'une telle augmentation de la production permette d'assurer une meilleure sécurité énergétique aux ÉU. En effet, une augmentation substantielle de la production d'éthanol ne peut se faire sans destiner davantage de terres aux cultures énergétiques. En 2005, environ 14% de la récolte de maïs aux ÉU a été convertie en éthanol, soit 39,93 millions de tonnes sur une récolte totale de maïs de 282 millions de tonnes, alors qu'environ 17% l'a été en 2008, soit 56,26 millions de tonnes de maïs récoltés sur une production nationale de 331,18 millions de tonnes (Brown, 2006b; Gilland, 2006; RFA, 2009a). Eaves et Eaves (2007) ont par ailleurs estimé que 1203 millions de tonnes seraient nécessaires afin de remplacer seulement 15% de la consommation actuelle de pétrole, un pourcentage en deçà des objectifs de 20% mis de l'avant par le président Bush. En fait, si les ÉU destinaient l'ensemble de leur production actuelle de maïs à la production d'éthanol, celle-ci ne remplacerait que de 3% à 7% de la consommation actuelle de pétrole (Eaves et Eaves, 2007; Pimentel et Patzek, 2007). Si les ÉU allaient de l'avant avec l'objectif gouvernemental de produire 20% de leur consommation de carburant uniquement par la filière du maïs, ils devraient allouer cinq fois plus de superficies que celles actuellement destinées à la culture du maïs.

Pimentel, Patzek et Cecil (2007) rapportent que pour remplacer l'ensemble de la consommation d'énergies fossiles dans le monde par l'éthanol, 2,4 milliards d'hectares de terres fertiles seraient nécessaires, soit 60% de plus de terres cultivées qu'il ne s'en cultive déjà sur la planète. Toutefois, selon l'OCDE, seulement 400 millions d'hectares de nouvelles terres seraient disponibles d'ici 2050 pour la production d'énergie (Doornbosch et Steenblik, 2007). Aucune ne se trouverait en Amérique du Nord. Or, déjà, Biofuelwatch (2007) rapporte en Amérique du Sud et en Asie, de nombreux conflits d'usage des terres dus à l'expansion des monocultures énergétiques et notamment des violations des droits humains prenant la forme d'expropriations violentes et de meurtres de paysans dans les grandes monocultures de soya, de canne à sucre et de palmier à huile.

Des partisans de la filière éthanol-maïs avancent que la forte demande en énergie liquide peut être compensée par l'augmentation des rendements de la culture du maïs et des surfaces cultivées (Naylor, Falcon et Zavaleta, 1997; Reilly *et al.*, 2003). Toutefois, soutiennent Runge et Senauer (2007), l'augmentation des rendements (inférieurs à 2% annuellement) stagne depuis dix ans et l'expansion des cultures se ferait alors au détriment des terres productives mais déjà destinées à l'alimentation ou encore des terres fragiles et donc déjà moins productives, ce qui devrait inciter à revoir à la baisse les estimés de production qui les incluent dans le calcul de potentiel de production de carburants végétaux, comme s'il s'agissait de terres très productives.

Ajoutons en outre que la réaffectation des terres agricoles productives qui passent alors de la production d'un maïs alimentaire (ou de toute autre culture alimentaire) vers un maïs énergétique déstabilise profondément les marchés mondiaux. Les ÉU étant responsables de plus de 40% de l'approvisionnement mondial de maïs (USDA-NASS, 2008), la diminution de l'approvisionnement en maïs, au profit d'un carburant domestique, favorise l'instabilité alimentaire mondiale en déséquilibrant les voies traditionnelles d'approvisionnement. En outre, en soustrayant une part du maïs-grain des échanges alimentaires internationaux, on diminue l'accessibilité aux denrées, avec des impacts en matière de déstabilisation sociale, notamment pour les pays consommateurs de maïs, comme on l'a vu dans le cas du Mexique.

Au cours des prochaines années, cette situation risque de s'aggraver sous l'effet de l'augmentation anticipée des températures associées au réchauffement climatique, ce qui accroîtra la pression sur le secteur agricole, déjà fort dépendant des conditions du climat (Eaves et Eaves,

2007). L'accroissement des températures est généralement associé à une occurrence plus importante de maladies et de ravageurs des cultures, à une accentuation des problèmes d'accès et d'utilisation de l'eau et à l'occupation des sols et à leurs contaminations.

Bref, il est certainement illusoire de croire que la production d'un carburant domestique issue de la culture du maïs puisse permettre d'aspirer à une meilleure sécurité énergétique. Paradoxalement, l'éthanol-maïs augmenterait encore davantage la dépendance énergétique des États-Unis envers le pétrole à cause du bilan énergétique déficitaire de l'éthanol-maïs attribué par plusieurs chercheurs (Pimentel, 2001, 2003; Pimentel et Patzek, 2005; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007). Vouloir soustraire sa dépendance au pétrole, en recourant à carburants végétaux, eux-mêmes dépendants des aléas du climat, de la fluctuation des rendements agricoles et du commerce des denrées et exigeant des cultures elles-mêmes gourmandes en pétrole, contribue davantage à déplacer le risque qu'à le limiter, surtout si les autres paramètres comme la taille et la gourmandise du parc automobile ne sont pas pris en compte dans l'équation.

3.2.6 L'éthanol-maïs en tant qu'agent de développement économique

Certains soutiennent également que la production d'éthanol à partir du maïs est bénéfique pour l'économie nationale, notamment le gouvernement canadien selon lequel la production d'éthanol contribuerait à la croissance économique et à la création d'emplois à l'échelle régionale, en contribuant à diversifier et à renforcer les économies rurales (Canada, 2007f).

Aux États-Unis, l'industrie de l'éthanol soutenait 147,000 emplois en 2004 (USDOE, 2006). L'USDOE estime que 2,500 à 5,000 nouveaux emplois sont créés pour chaque milliard de litres d'éthanol additionnel mis en production. Alors que 54 usines produisaient un peu moins de 7,5 milliards de litres d'éthanol il y a six ans, environ 170 usines fabriquaient annuellement, en 2008, plus de 34 milliards de litres, principalement à partir du maïs (RFA, 2009b). De 2000 à 2005, la production d'éthanol-maïs a augmenté de 150% (FAO, 2006) dans le monde. Aux États-Unis, deux fois et demie plus de maïs ont été destinés à la production d'éthanol entre 2000 et 2006 (Brown, 2006b) et en 2007, 19% de la récolte de maïs y était consacrée (Leibtag, 2008).

Outre les bénéfices escomptés pour l'économie nationale, l'industrie de l'éthanol contribuerait également à revitaliser les économies rurales. Ainsi, selon De La Torre Ugarte *et al.* (2003), l'augmentation des prix pour les cultures traditionnelles ainsi que les revenus additionnels provenant des cultures énergétiques pourraient faire augmenter les revenus agricoles nets de 6 milliards \$US par année. En 2006, les prix du grain, spécialement celui du maïs, atteignaient des niveaux records comparativement à l'année précédente, notamment à cause de l'accroissement de la demande en éthanol (FAO, 2006). Aux ÉU, le prix du maïs destiné à l'exportation valait alors, en novembre 2006, 164\$ US la tonne comparativement à environ 100\$ la même tonne pour les années précédentes.

Selon un rapport publié par la firme financière JP Morgan, les prix moyens du maïs-grain devaient bondir de 61%, pour la seule année 2007 (Bhattacharya, Barkley et Parks, 2007). Le prix du boisseau de maïs est passé de 2 à 3,40 \$US entre 2005 et 2007 (Leibtag, 2008). Kim et Dale (2008) rapportent que, dans la plupart des huit états où ils ont mené leur étude, « *more money returned to society than the investment for producing ethanol* » (p. 5250). La production de maïs destinée à l'éthanol fournirait à l'agriculteur une importante source de revenus supplémentaires, le libérant en partie des mesures gouvernementales de soutien à l'agriculture (USDOE, 2006). Cette multiplication des débouchés pour le maïs-grain, entre le secteur agroalimentaire et le secteur de l'énergie, ferait donc augmenter la demande et ainsi le prix des cultures comme le maïs. Cela réduirait d'autant les coûts pour les programmes de soutien, prétendaient, en 2002, Shapouri, Duffield et Wang, alors que ces impacts étaient encore peu observables.

Dans les faits, au Canada comme aux ÉU, le secteur de l'éthanol-maïs est fortement subventionné et les coûts de production de l'éthanol-maïs sont encore trop élevés pour que l'éthanol puisse concurrencer le pétrole. Selon Pimentel (2003), la production d'un litre d'éthanol-maïs coûterait 1,94\$US comparativement à 0,53\$US pour un litre d'essence.

Tyner et Taheripour (2007) remarquent que les ÉU ont subventionné le secteur de l'éthanol à la hauteur de 40 à 60% durant la dernière décennie, ce qui équivaut à des subventions d'environ 13,5¢US le litre. Dans l'ensemble, le litre d'éthanol serait subventionné à 79¢US, en considérant les subventions directes à l'éthanol cumulées à celles destinées à soutenir la culture du maïs (Tyner et Taheripour, 2007).

En ce sens, et contrairement à ce que prétendaient Shapouri et al. (2002), augmenter la production d'éthanol-maïs ferait très certainement augmenter les subsides gouvernementaux investis pour la production d'éthanol. En 2002, ces investissements s'élevaient aux ÉU à 1,4 milliard \$US (Pimentel, 2003). À cela, il faudrait ajouter les dépenses publiques visant à contrer les effets de la pollution reliée à la production et à combustion de l'éthanol. Plus de huit milliards de dollars US en subvention ont été versés en 2006 pour encourager la production d'éthanol (Carey, Carter et Shameen, 2007; PC, 2007; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007).

Au Canada, peu d'informations sont disponibles à ce sujet. Outre la loi C-33 qui prévoit l'inclusion de 5% d'éthanol dans l'essence (Banks, 2008) – l'équivalent de 2 milliards de litres annuellement – le gouvernement canadien a prévu investir environ 2 milliards \$Can pour appuyer la production d'éthanol (Canada, 2007e). Depuis 2001, l'éthanol était exempté de la taxe d'accise fédérale (10¢/L), alors qu'à compter du 1^{er} avril 2008, la loi C-28 abroge ces exemptions sur tous les carburants renouvelables pour les inclure dans la structure de taxation qui s'applique à l'essence et au diesel⁴³ (Canada, 2008a Côté, 2007).

Cependant, comme le souligne un rapport conjoint de l'OCDE et de la FAO (OCDE/FAO, 2007), la production de carburants végétaux risque de ne bénéficier qu'à un groupe social restreint, par exemple ceux qui ont les moyens de réaliser des productions à grande échelle. Alors que jusqu'à tout récemment, les raffineries appartenaient à des groupes de producteurs de maïs, les grands des secteurs de l'agroalimentaire, de l'automobile et du pétrole ont en quelque sorte fait main basse sur une part de la chaîne de production. « Les groupes pétroliers, céréaliers, et les producteurs de cultures transgéniques renforcent leur présence sur toute la chaîne de valeur ajoutée des agrocarburants », soutient Holtz-Giménez (2007). Ainsi, 65% du marché des céréales seraient contrôlés par les grands de l'agrobusiness comme Cargill et ADM, de même que Monsanto pour le marché des OGM (Holtz-Giménez, 2007). En ce sens, les fortes pressions exercées par le complexe agro-industriel sont un facteur important quant à l'augmentation rapide de la production d'éthanol-maïs, alors qu'il devient de plus en plus profitable d'investir dans cette forme d'énergie, compte tenu de l'actuelle flambée des prix du pétrole (ONU, 2007a). Des lois, comme la C-33 au Canada, font dire à certains que les nouvelles réglementations ne sont rien d'autre que des

⁴³ *Loi portant exécution de certaines dispositions du budget déposé au Parlement le 19 mars 2007 et de certaines dispositions de l'énoncé économique déposé au Parlement le 30 octobre 2007 (Loi d'exécution du budget et de l'énoncé économique de 2007)*

subventions aux entreprises du secteur agro-industriel. Comme le souligne si bien Dufey (2007), il est fort peu probable que les petits exploitants puissent réellement profiter du boom actuel de l'éthanol.

Plus encore et compte tenu de la forte demande de maïs pour cette filière, la soudaine rareté du maïs fait actuellement de ce grain une valeur refuge sur les marchés boursiers. Conséquemment, il on a vu se créer une bulle spéculative autour du maïs. L'*International Food Policy Research Institute* souligne que ce type de transactions spéculatives participerait à la volatilité des prix des denrées (von Braun, 2007). Runge et Senauer (2007) parlent d'une *biofuel mania* où les fonds d'investissement placent d'importantes sommes d'argent dans le maïs. « *It seems to unite powerful forces, including motorists' enthusiasm for large, fuel-inefficient vehicles and guilt over the ecological consequences of petroleum-based fuels* » (p. 41). John Greenwood, un chroniqueur du *National Post*, signale également une véritable ruée vers « l'or vert » en Saskatchewan où de grands investisseurs achètent des terres pour cultiver du maïs en prévision de l'augmentation des prix de l'éthanol (Greenwood, 2007).

3.2.7 La hausse du prix des denrées et la sécurité alimentaire

Toutefois, bien au-delà de la question environnementale, la question alimentaire devient de plus en plus l'enjeu de premier plan quant à l'avenir des carburants végétaux de 1^{ère} génération. On rapporte ainsi que l'augmentation importante de la production de carburants végétaux de 1^{ère} génération, principalement celle issue des ÉU et de l'Union Européenne, est la principale raison de la forte croissance du prix mondial des denrées depuis 2002 et de la crise alimentaire mondiale subséquente (Mitchell, 2008). Sans cette augmentation, il faut croire que les stocks de maïs et de blé n'auraient pas périclité aussi rapidement et que leur prix n'aurait pas augmenté au même rythme que la demande.

L'éthanol-maïs, tout particulièrement, met ainsi en concurrence l'alimentation et l'énergie qui risque fort de laisser les pauvres et les actuelles victimes de la faim encore davantage à la merci des prix des denrées, de la terre et de l'eau (ONU, 2007a). L'importante quantité de maïs-grain nécessaire à la production d'éthanol met une pression énorme sur le secteur de l'alimentation. En ce sens, « *much greater production of ethanol from corn may conflict with food production needs* » (Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007, p. 416). Le détournement d'un maïs alimentaire

vers une production énergétique fait à la fois directement augmenter son prix mais aussi le prix des autres grains. La spéculation financière touchant aujourd'hui le phénomène des carburants végétaux ne participe que davantage à l'accroissement des prix. En produisant un carburant à partir d'une source qui est aussi une des ressources céréalières les plus consommées sur la planète, c'est la sécurité alimentaire mondiale qui est fragilisée. Compte tenu que la production d'éthanol nécessite de grandes quantités d'eau, notons également qu'une augmentation subséquente de son prix diminuera l'accès des plus pauvres à l'eau, mettant encore davantage en péril la sécurité alimentaire (ONU, 2007a).

La popularité croissante pour les carburants végétaux de 1^{ère} génération a des conséquences sur le reste de la chaîne alimentaire de la population mondiale. Notamment, elle a fait croître les prix mondiaux du maïs, du soya et de la canne à sucre. La Presse canadienne rapporte que le détournement du maïs pour la production d'éthanol a donné lieu à une hausse de 60 % des prix du maïs entre 2005 et 2007 (PC, 2007). L'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires prévoit un accroissement de 20% des prix du maïs sur les marchés mondiaux d'ici 2010 et de 41% dix ans plus tard (Rosegrant *et al.*, 2006). La production croissante de maïs destiné à la fabrication d'éthanol, liée aux incitatifs gouvernementaux, a fait diminuer la production d'autres céréales, comme le riz, le blé et l'orge, contribuant à la hausse de leur prix (Runge et Senauer, 2007)⁴⁴. Les prix élevés du baril de pétrole et du maïs-grain entraînent les agriculteurs à consacrer davantage de leurs superficies exploitables à la culture du maïs (Brown, 2006a; FAO, 2006). Selon les termes du chroniqueur Louis-Gilles Francoeur (2007b), les « agriculteurs se rendent compte qu'il sera plus payant de remplir les réservoirs de VUS que les estomacs d'humains ou d'animaux ». Aux ÉU, où le maïs-grain est à 70% destiné au bétail, toute augmentation des prix du grain fait d'autant plus augmenter le prix à la consommation de la viande, du lait et des œufs (Pimentel, Patzek et Cecil, 2007).

Les conséquences de cette rareté du maïs-grain sur le prix des denrées se feront aussi sentir dans les pays plus pauvres, notamment par le ralentissement de l'approvisionnement en maïs en provenance des ÉU. Alors que la consommation mondiale n'a cessé d'augmenter, passant de 815 millions de tonnes en 1960 à 2 milliards en 2006, la part de maïs-grain aux ÉU destinée à l'exportation est restée stable, avoisinant les 57 millions de tonnes alors que, pour la première

⁴⁴ Le prix du blé aurait augmenté de 130% entre mars 2007 et mars 2008, tandis que le prix du riz aurait plus que doublé en Asie durant les trois premiers mois de 2008 (BBC, 2008a, 2008b).

fois, la part destinée à la production d'éthanol a atteint les mêmes volumes (Brown, 2006b). Dans un rapport de l'OCDE/FAO (2007), on observe que les prix mondiaux de produits tels que la viande bovine et porcine, la volaille, le sucre, les huiles, les oeufs et les produits laitiers seront en augmentation constante durant la prochaine décennie (voir fig. A.4). Pimentel *et al.* (1995) soulignaient que « *the world population's food demand is increasing at a time when per capita food productivity is beginning to decline* » (p. 1117). Conséquemment, on assiste à la fois à la diminution des récoltes et des réserves alimentaires, à la fois à l'augmentation du prix des denrées. L'augmentation rapide du prix des denrées aura d'importantes conséquences sur le nombre de personnes souffrant de sous-alimentation, augmentant de 16 millions de personnes chaque accroissement de 1% du prix des aliments (Rosegrant *et al.*, 2006). L'ONU (2007a) estime que c'est 1,2 milliard de personnes qui risqueront de souffrir de la faim d'ici 2025.

L'augmentation du prix des terres est une autre des conséquences de l'engouement pour l'éthanol-maïs. Au Québec seulement, le prix moyen des terres agricoles a augmenté d'environ 6% en 2006, un phénomène qui serait lié à la demande croissante de maïs destiné à la production nord-américaine d'éthanol (Fournier, 2007).

La mise sous tension du maïs entre l'alimentation et le transport provoque, comme nous venons de le voir, l'augmentation de son prix et rend plus difficile l'accès à la ressource. Faire le plein (~ 95 litres) d'un VUS avec un mélange E100 d'éthanol-maïs nécessite plus de 200 kg de maïs-grain (Runge et Senauer, 2007), l'équivalent en calories, selon l'Institut international de l'eau à Stockholm, à l'énergie nécessaire pour nourrir une personne pendant un an (AFP, 2007).

À travers l'augmentation du prix des denrées, Runge et Senauer (2007) préviennent que 1,2 milliard de personnes souffriront de sous-alimentation dans le monde, soit deux fois plus qu'annoncées par la FAO (2002). Ainsi, pour chaque tranche d'augmentation de 1% du coût des denrées, c'est 16 millions de personnes de plus qui font face à l'insécurité alimentaire (Runge et Senauer, 2007). La FAO et l'UNESCO pointent désormais du doigt les carburants végétaux comme étant un des responsables de la crise alimentaire qui sévit actuellement (FAO, 2008; UNESCO, 2008).

Le cas du Mexique est un exemple de la crise alimentaire liée en partie aux carburants végétaux (Anonyme, 2007; Bhattacharya, Barkley et Parks, 2007). En février 2007, le prix du maïs a atteint

son plus haut niveau en dix ans, provoquant une hausse dramatique du prix de la tortilla, aliment de base de la culture mexicaine⁴⁵ (Holtz-Giménez, 2007). En Afrique, l'*Alliance for a Green Revolution*, regroupant la Rockefeller Foundations et le milliardaire Bill Gates, propose d'investir 170 millions \$US pour y aider au développement de l'agriculture. De nombreuses associations africaines, sur 12 pays, se sont opposées à cette proposition, arguant que « *the push for a corporate-controlled chemical system of agriculture is parasitic on Africa's biodiversity, food sovereignty, seed and small-scale farmers* » (Ross, 2007).

Pimentel (2006, p. 199) ajoute que l'érosion des sols « *is one of the most serious environmental and public health problems facing human society* ». Accélérée par l'intensification des cultures et par la course aux rendements, l'érosion réduit la disponibilité de terres arables et des sols cultivables. Jean Ziegler, le Rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation de l'ONU, a récemment réclamé un moratoire d'au moins cinq ans sur leur production, soulignant l'importance « de briser la spéculation afin de maîtriser l'augmentation des prix alimentaires » (ONU, 2008).

3.2.8 Un deuxième constat

Les informations recueillies dans cette section montrent que l'éthanol-maïs est une énergie présentant plus de conséquences néfastes ou négatives sur l'environnement et sur la société que les bénéfiques qu'elle est supposée engager. La demande croissante en carburants végétaux de 1^{ère} génération requiert des pratiques agricoles intensives, conduisant à multiplier les monocultures. Comme les informations tendent à le montrer, ces pratiques agricoles mènent généralement à la détérioration de la qualité des sols, principalement due à l'érosion, et à la diminution des ressources hydriques. Les apports importants en engrais et en pesticides ont aussi des impacts sur la santé des écosystèmes et sur la santé humaine.

Le développement de cette filière met aussi en jeu la question de l'utilisation des terres : privilégiant la production énergétique au détriment de la production alimentaire et le développement d'une agriculture intensive au détriment de la conservation d'écosystèmes

⁴⁵ Depuis la mise en place de l'Accord de libre-échange nord-américain – ou Aléna –, le Mexique importe 30% du maïs que sa population consomme, essentiellement en provenance des États-Unis.

naturels. La production de carburants végétaux met une forte pression sur la biodiversité et sur l'approvisionnement alimentaire des populations mondiales. En mettant en concurrence le secteur alimentaire et la filière énergétique, la production d'éthanol exacerbe la crise alimentaire mondiale, amplifiée par l'augmentation des prix du pétrole et par les impacts en cascades du réchauffement climatique.

Aux ÉU, les arguments appuyant le développement de la filière de l'éthanol-maïs se contredisent. Ainsi, cette filière augmenterait tout autant la dépendance énergétique envers les énergies fossiles car la production d'éthanol à partir du maïs nécessiterait plus d'énergie que l'éthanol n'en fournit, selon les estimations de chercheurs comme Pimentel et Patzek. Le développement économique régional et les bénéfices économiques nationaux associés au développement de cette filière reposeraient, par ailleurs, essentiellement sur le support de l'État (Carey, Carter et Shameen, 2007; PC, 2007; Pimentel, Patzek et Cecil, 2007; Tyner et Taheripour, 2007). Comme le remarque De Oliveira, Vaughan et Rykiel Jr. (2005), la filière de l'éthanol-maïs aux ÉU, en tant qu'alternative au pétrole, n'est pas une option viable. Elle n'est finalement ni une voie *environmentally friendly*, ni une voie permettant d'assurer une meilleure sécurité énergétique pour la nation.

Une question reste toutefois : à qui profite le développement d'une option qui n'est ni une alternative viable, même partielle, aux carburants fossiles, ni une réponse à l'enjeu de sécurité énergétique et ni une option *environmentally friendly*? Pour Wyman (2001), ce sont très clairement le lobby du maïs⁴⁶, l'industrie de l'automobile, du pétrole et de l'agroalimentaire qui sont les grands acteurs et les grands bénéficiaires de la croissance de cette filière.

Le CEO (2007) souligne que le développement et la promotion des carburants végétaux par les gouvernements sont fortement influencés par « *the strong lobbying activities of interested industries, such as car-manufacturers, biotech companies and the oil industry* ». L'importante production d'éthanol-maïs aux ÉU serait due autant aux efforts des lobbyistes, aux politiques agricoles et aux subventions qu'à la mise en œuvre de l'idée d'atteindre une meilleure indépendance énergétique (Schnoor, 2007). En ce sens, la recherche d'une option répondant aux

⁴⁶ Nous vous présentons quelques exemples de lobby de l'éthanol : National Corn Growers Association (NCGA), Association canadienne des carburants renouvelables (ACCR), Governors' Ethanol Coalition (GEC), Renewable Fuels Associations (RFA).

critères de sécurité énergétique et d'environnement ne bénéficierait alors seulement qu'à certains groupes sociaux particuliers, dont sont très certainement exclus les citoyens en finançant, à travers leurs impôts et leurs taxes, le soutien à une industrie polluante et énergivore. Au même moment, ce sont également eux qui paient davantage pour les denrées alimentaires de bases.

Le dernier rapport de l'OCDE/FAO (2007) souligne que cette filière est susceptible de ne bénéficier qu'à ceux qui seront en mesure de supporter des productions agricoles à échelle commerciale, bien que les bénéfices semblent suffisamment attrayants pour faire passer de nombreux petits exploitants agricoles à une culture énergétique du maïs.

Quel peut alors être le poids de l'argument environnemental face à une force économique qui produit la ressource, développe les technologies de production et distribue le carburant? À qui profite cette transition? S'agirait-il, comme certains le remarquent, tout simplement d'un moyen de soutenir une économie intérieure, au profit des grands lobbies agro-industriels?

L'éthanol-maïs, présenté comme un carburant vert, risque d'en être qu'un moyen de subventionner, de stimuler et de développer une agriculture industrielle et intensive dans un contexte de concentration industrielle de plus en plus marqué. Vu les coûts élevés de production et vu la résistance des consommateurs peu enclins à payer 30 à 40% de plus que pour l'essence, la production d'éthanol-maïs ne peut se passer de subventions de l'État. Une telle filière permet en outre aux gouvernements de supporter l'agriculture nationale sans violer les règles du commerce international.

L'ensemble des enjeux socio-économiques présentés suggère que l'argument environnemental de l'éthanol-maïs vient loin derrière ceux-ci et sert essentiellement d'argument publicitaire. Même lorsque la démonstration est faite que l'éthanol-maïs représente un danger pour la sécurité alimentaire de centaines de millions de personnes sur la planète, tout particulièrement pour les plus pauvres, cet enjeu est balayé du revers de la main au profit de questions purement commerciales. À ce sujet, notons la progression du dernier *US Energy Bill* et du projet de loi C-33 au Canada qui met de l'avant une production d'éthanol qui sera inévitablement en bonne partie issue du maïs. Le *US Energy Bill* de 2007 veut notamment faire croître la production d'éthanol issu du maïs-grain à 57 milliards de litres d'ici 2022, 3 fois plus que l'ensemble de la production d'éthanol des ÉU en 2006. tandis que le projet de loi C-33 donne au gouvernement du canadien,

par voie réglementaire, le pouvoir d'imposer des pourcentages précis d'éthanol dans l'essence au pays. Certes, on peut observer que l'argument alimentaire commence à être pris en compte et, qu'à titre d'exemple, le candidat du parti Républicain lors de la dernière campagne présidentielle aux ÉU, a fait valoir qu'une réduction des subventions à l'éthanol-maïs était nécessaire pour faire face à l'accroissement du prix des denrées.

Ajoutons à ce tableau que la production de carburants végétaux contribue à l'accroissement de la diffusion des OGM dans l'agriculture. De plus, pour être compétitives et répondre à la demande croissante, les cultures énergétiques devront nécessairement être cultivées à grande échelle, sous forme de monoculture intensive. Toutefois, les cultures OGM, concentrées en quatre plantes (soya, maïs, coton et colza), dont la caractéristique même est d'être pesticides puisque 15% produisent leur propre insecticide, que 63% sont conçues pour ne pas mourir en présence massive d'herbicides et que 22% intègrent les deux caractéristiques, contribuent à la réduction de la biodiversité (Clive, 2008). Benbrook (2004) fait également état que les cultures transgéniques ont eu pour effet aux ÉU d'augmenter l'usage de pesticides. En outre, les cultures intensives réduisent la fertilité des sols, risquant alors d'avoir des conséquences négatives en termes de productivité. De plus, compte tenu qu'ils sont tirés des mêmes espèces végétales qui servent à l'alimentation, les risques de contamination génétique des cultures énergétiques vers les cultures alimentaires sont d'autant plus grands. Leur provenance commune risque aussi de stimuler l'expansion du génie génétique pour la production alimentaire (Biofuelwatch, 2007).

L'ensemble des conséquences environnementales et sociales liées à la production industrielle et à l'usage de l'éthanol-maïs nous semblent suffisantes pour souligner le danger d'une telle option. En ce sens, l'éthanol-maïs ne semble pas représenter une solution viable à la problématique anticipée des changements climatiques, risquant plutôt de l'exacerber. L'éthanol-maïs ne semble également pas représenter une alternative viable et partielle aux énergies fossiles. L'éthanol-maïs n'est-il tout simplement qu'une réponse économique et énergétique à laquelle on cherche à donner une image *verte*?

Devant la controverse suscitée par la 1^{ère} génération, plusieurs proposent une nouvelle forme de carburant végétal : l'éthanol issu de la cellulose. Cette 2^{ème} génération posséderait les vertus environnementales que la précédente ne présente plus actuellement. Comme nous le verrons, de nombreux auteurs soulignent que cette nouvelle approche permettrait d'éviter les écueils de la

compétition alimentaire et de l'usage des terres. Au prochain chapitre, nous examinerons le cas de cette option de 2^{ème} génération. Nous chercherons à savoir si elle peut réellement remplir les promesses qui y sont associées : répondre à la fois au désir d'indépendance énergétique, de sécurité alimentaire, de lutte aux changements climatiques, de protection de l'environnement et de développement économique dans le contexte mondial d'une demande énergétique croissante liée aux transports.

CHAPITRE IV

LA PRODUCTION D'ÉTHANOL À PARTIR DE LA PAILLE DE MAÏS : UN CHOIX VIABLE?

Le précédent chapitre nous a permis de faire le constat que l'éthanol-maïs, en tant que carburant végétal de 1^{ère} génération, n'est pas une alternative viable, même partielle, aux carburants fossiles, cachant des coûts environnementaux et sociaux importants. Toutefois, à l'instar de ce qu'ont été les carburants végétaux de 1^{ère} génération, l'option cellulosique est aujourd'hui considérée par ses partisans comme une voie à emprunter face à la crise énergétique et face aux impacts anticipés des changements climatiques.

L'éthanol cellulosique est, rappelons-le et comme en témoigne clairement le département de l'énergie aux États-Unis, produit à partir de la biomasse végétale, incluant toutes les plantes ou tous les produits dérivés de ces plantes (USDOE, 2008a). Selon plusieurs, l'éthanol cellulosique présenterait même de nombreux avantages environnementaux et sociaux, tant par rapport aux carburants fossiles qu'aux carburants végétaux de 1^{ère} génération (De La Torre Ugarte, 2005; Koonin, 2006; Parrika, 2004; Perlack *et al.*, 2005; USDOE, 2006).

Déjà au début des années 1990, certains avançaient que des carburants produits à partir d'une biomasse végétale, tels que les résidus agricoles, présenteraient des bénéfices non négligeables pour l'environnement, tout en sustentant une part importante des besoins énergétiques nationaux des États-Unis (Lynd *et al.*, 1991; Tyson, 1993). Il s'agissait notamment d'une manière de développer un carburant maison à partir de ressources renouvelables et abondantes. Les résidus agricoles, comme la paille de maïs, étaient déjà considérés à cette époque comme des déchets sous-utilisés de l'agriculture, possédant un fort potentiel de valorisation énergétique.

Aujourd'hui, face à la controverse de l'éthanol-maïs, on compte maintenant sur la voie cellulosique afin de réduire la dépendance au pétrole et les émissions de GES (Cho, 2007; De La Torre Ugarte, English et Jensen, 2007; Greene et Mugica, 2005; Perlack *et al.*, 2005; Sanderson, 2006; USDOE, 2006; USSenate, 2007). Comme le souligne Sanderson (2006), « *The requirement of lots of inputs like fertilizers, water and pesticides with very less output of sugar has made the US government look for alternatives to improve US energy security by producing cellulosic ethanol* ». Compte tenu qu'il se cultive 37,9 millions d'hectares de maïs aux ÉU en 2007, comparativement à 25,8 millions d'hectares pour le soya et à 24,5 millions d'hectares pour le blé (Canada, 2008e; USDA-NASS, 2008), les résidus du maïs représentent alors un substrat de choix afin de permettre, au moins à court terme, une réelle production industrielle et commerciale d'éthanol cellulosique aux ÉU.

L'importante production de maïs laisse ainsi derrière elle un grand volume de résidus de cultures que de nombreux acteurs cherchent, comme nous le verrons plus loin, à valoriser sous la forme d'éthanol. Plusieurs scientifiques estiment que l'éthanol issu de la paille de maïs permettrait de réduire les émissions de GES, posséderait une balance énergétique positive et serait renouvelable (Hoskinson *et al.*, 2007 ; Sheehan *et al.*, 2003 ; von Blotnitz et Curran, 2007 ; Wang, 2005). Mieux encore, ils avancent que cette production n'entrerait pas en concurrence avec le secteur alimentaire pour l'utilisation des terres. Certains soutiennent même qu'on pourrait récolter à la fois le maïs-grain pour l'alimentation et à la fois la paille pour la production d'éthanol (Cole *et al.*, 1997; Hoskinson *et al.*, 2007). Son abondance et sa forte composition en carbone permettraient de valoriser, sous forme d'énergie liquide, une importante biomasse (la paille du maïs) normalement laissée aux champs et considérée, à tort, comme des déchets agricoles. En plus d'être disponibles en très grandes quantités, les résidus du maïs sont aussi considérés comme une biomasse de bien meilleure qualité que ceux du soya (l'autre résidu agricole en importance aux ÉU), ces derniers se dégradant trop rapidement (Kadam et McMillan, 2003).

Comme nous le verrons dans cette section, l'option cellulosique nous est présentée sous la forme d'un carburant aux potentiels incroyables. En outre aux ÉU, on semble attendre beaucoup de l'éthanol cellulosique alors que le USDOE, dans son *Biomass Program*, considère d'entrée de jeu les carburants issus de la biomasse comme « *the only clean, renewable energy source that can help to significantly diversify transportation fuels in the U.S.* » (USDOE, 2008b). Aux ÉU seulement, quoiqu'on ne produise actuellement que quelques millions de litres d'éthanol-maïs

cellulosique par année, des cibles gouvernementales espèrent faire augmenter sa production à près de 80 milliards de litres par année d'ici 2022 (USSenate, 2007). Pourtant, sa production à l'échelle commerciale n'est toujours pas assurée et son développement est intimement lié aux promesses de technologies toujours en développement, notamment en brisant la barrière lignocellulosique qui permettrait d'avoir plus aisément accès à la cellulose.

En outre, l'éthanol cellulosique peut-il réellement parvenir à atteindre ces objectifs sans mettre en péril, à l'instar de l'éthanol-maïs, à la fois la pérennité de la productivité des sols et la sécurité alimentaire, à la fois l'intégrité des écosystèmes et celle de la biodiversité?

Ce chapitre, qui s'appuie sur une revue de la littérature des effets de l'ensemble de la production de l'éthanol-maïs cellulosique, vise à observer dans quelle mesure ce carburant d'origine végétale, promu au rang de nouvel or vert, peut être considéré comme une option viable. Nous aborderons principalement le cas de l'éthanol-maïs de 2^{ième} génération, compris comme l'éthanol produit à partir de la paille de maïs⁴⁷ ou encore comme l'éthanol-maïs cellulosique. Cependant, la paille de maïs ne couvre pas à elle seule l'ensemble des enjeux reliés aux carburants végétaux de 2^{ième} génération. Pour compléter le tableau, nous nous intéresserons également, mais de façon sommaire, aux cas des cultures énergétiques pérennes, à la sylviculture énergétique et aux résidus forestiers (ce dernier cas étant tout particulièrement important au Québec). Aucune étude sur les effets de la production de l'éthanol-maïs cellulosique au Canada n'a toutefois été trouvée. À l'instar de la production scientifique sur le cas de l'éthanol-maïs, les études portant sur le sujet proviennent essentiellement des ÉU.

4.1 LES DÉFIS DE L'ÉTHANOL-MAÏS CELLULOSIQUE.

L'option cellulosique est généralement présentée comme une option qui permettra d'augmenter significativement la production d'éthanol sans mettre en péril la sécurité alimentaire mondiale. Ainsi, on présente le monde végétal comme un volumineux bassin de sucre sous-utilisé et fermentable, qu'il serait possible de convertir en éthanol. Grâce au développement imminent de nouvelles variétés végétales transgéniques contenant plus de cellulose et moins de lignine, et

⁴⁷ Il s'agit de la tige et des feuilles du plant de maïs. Son équivalent anglais correspond à l'expression de « *corn stover* ».

grâce également à de nouvelles souches microbiennes visant à accélérer le processus de la fermentation, il serait ainsi possible de diminuer la « récalcitrance » naturelle de la biomasse végétale et de vaincre la résistance naturelle des parois cellulaires à une dégradation microbienne et enzymatique (Himmel *et al.*, 2007). En perçant cette barrière lignocellulosique qui rend difficile l'accès aux différents sucres contenus dans la biomasse végétale, c'est l'ensemble du monde végétal qui pourrait potentiellement être transformé en éthanol.

Ce développement annoncé du génie génétique fait dire à certains auteurs que nous assistons en ce moment à un changement du paradigme énergétique : c'est le *new manufacturing paradigm* chez Ragauskas *et al.* (2006), le *new developing energy paradigm* de Johnson *et al.* (2007) ou encore le *new energy paradigm* pour De La Torre Ugarte (2005). Ces auteurs annoncent une transition d'une culture du pétrole à celle des carburocultures. L'anticipation de la fin des réserves de pétrole, l'instabilité géopolitique de ces régions productrices et l'accroissement de la demande énergétique mondiale favoriseraient ce changement. En outre, les impacts socio-environnementaux des carburants de 1^{ère} génération et le développement des biotechnologies permettant l'utilisation de la biomasse cellulosique le précipiteraient encore davantage. À moins, bien entendu, qu'à la faveur de la crise financière actuelle, de ses impacts économiques et de ces contre-coups majeurs sur l'industrie automobile, d'autres alternatives aux carburants en matière de transport, tels l'électricité et l'hydrogène, ne viennent modifier le paysage.

4.1.1 L'augmentation potentielle de la production mondiale d'éthanol

Kim et Dale (2004) estiment qu'il serait possible de produire 442 milliards de litres à partir des différents résidus agricoles disponibles dans le monde, soit environ 7 fois plus que l'ensemble de la production mondiale actuelle d'éthanol (estimée à plus de 65 milliards de litres). Vu la plus faible densité énergétique de l'éthanol, l'ensemble de l'éthanol issu des résidus agricoles pourrait remplacer ~316 milliards de litres d'essence, l'équivalent d'environ 27% de la consommation mondiale de carburants. Cette estimation ne tient toutefois pas compte des bienfaits agricoles de ces résidus, notamment pour le recyclage des nutriments et du maintien de la productivité des sols, ni des efforts nécessaires (c.g. sous forme d'engrais) pour compenser ces éventuelles pertes.

Aux ÉU, la paille de maïs est tout de même considérée comme l'une des principales sources végétales pour produire de l'éthanol cellulosique (Pacala et Socolow, 2004; Perlack *et al.*, 2005). De tous les résidus produits par l'agriculture, elle est celle qui se retrouve en plus grande quantité (Dhugga, 2007), correspondant à 49% (Lal, 2005) à 80% (Kadam et McMillan, 2003) de l'ensemble des résidus agricoles utilisables produits aux ÉU, se concentrant principalement dans les États du Midwest. Quoi qu'il en soit, les volumes totaux de résidus de la culture du maïs disponibles sont estimés entre 196 à 239 millions de tonnes (Graham *et al.*, 2007; Lal, 2005; Sokhansanj *et al.*, 2002).

Selon les estimations, l'ensemble de la récolte permettrait de produire de 23,75 milliards (Kadam et McMillan, 2003) à 38,4 milliards de litres d'éthanol (Kim et Dale, 2004). Tout au plus, cette production ne pourrait répondre qu'au tiers des objectifs du gouvernement des ÉU de produire 132 milliards de litres de carburants renouvelables d'ici 2022, dont 79 milliards devraient être issus d'autres sources que le maïs-grain (l'éthanol cellulosique issu des résidus agricoles vient en tête de liste) (USSenate, 2007). Rappelons que les ÉU produisent actuellement un peu plus de 34 milliards de litres d'éthanol (voir sect. 1.3.1).

Le tableau 4.1 montre le potentiel mondial de la production d'éthanol dérivé de la paille de maïs. Mondialement, 58,6 milliards de litres pourraient être produits annuellement. En fonction de sa densité énergétique, cette production pourrait remplacer environ 42,16 milliards de litres d'essence, ce qui ne représente qu'environ 3,7% de la consommation mondiale d'essence.

Tableau 4.1 Le potentiel régional de la production d'éthanol à partir de la paille de maïs

	Potentiel de production d'éthanol (GL)	Équivalent en essence (GL)
Afrique	-	-
Amérique Central	-	-
Amérique du Nord	38,40	27,63
Amérique du Sud	2,07	1,49
Asie	9,75	7,01
Europe	8,23	5,92
Océanie	0,07	0,05
Monde	58,60	42,16

d'après Kim et Dale (2004)

Les experts considèrent que le ratio de production du maïs-grain et de la paille est de 1:1 (Burt, 2006; Kim et Dale, 2004). Les 37,9 millions d'hectares destinés à la culture du maïs et sa récolte record de 13,1 milliards de boisseaux en 2007 (USDA, 2008) font donc rêver les promoteurs de l'option cellulosique qui, tel Parrika (2004), voient dans les résidus du maïs un énorme potentiel énergétique qui permettrait de répondre à une grande partie de la demande énergétique des ÉU.

Des investissements massifs

Alors que la voie de l'éthanol-maïs est de plus en plus proscrite vu ses répercussions sur la sécurité alimentaire mondiale, on investit de plus en plus massivement dans la voie cellulosique. Au Québec, après la raffinerie d'éthanol-maïs de Varennes, le gouvernement a investi 25 millions de \$Can dans la mise sur pied d'une chaire d'étude à l'Université de Sherbrooke afin de considérer tout le potentiel des résidus forestiers, alors que 20 millions de \$Can ont été annoncés pour la mise sur pied de deux projets d'usines pilotes d'éthanol cellulosique. Le gouvernement de l'Ontario participe également en investissant 5 millions de \$Can dans un projet de bioraffinerie expérimentale d'éthanol cellulosique produit à partir des résidus du maïs⁴⁸.

Les industries pétrolière et agroalimentaire ne sont pas en reste et semblent avoir un fort penchant pour l'option cellulosique. En outre, la *Royal Dutch Shell* a dernièrement augmenté à 50% ses parts dans la compagnie canadienne *Iogen Corporation* dans le but d'accélérer le développement et le déploiement de leur filière de production d'éthanol cellulosique à base de résidus agricoles⁴⁹. De même, DuPont, un des grands joueurs de l'agroalimentaire, s'associe à la *Biofuels Initiative* de l'université du Tennessee afin de construire d'ici décembre 2009 une bioraffinerie pouvant produire près d'un milliard de litres d'éthanol cellulosique issus des résidus principalement de la culture du maïs et du panic érigé⁵⁰, alors qu'ADM (*Archer Daniels Midland*), Monsanto et Deere

⁴⁸ Anonyme. 2008. Ontario invests in biofuel. *Biofuels international*. 10 juillet. En ligne : http://www.biofuels-news.com/news/ontario_invests.html, consulté le 10 juillet 2008.

⁴⁹ Anonyme. 2008. Shell extends investment in cellulosic ethanol. *Biofuels international*. 17 juillet. En ligne : http://www.biofuels-news.com/news/shell_extends.html, consulté le 17 juillet 2008.

⁵⁰ Anonyme. 2008. DuPont Danisco joins cellulosic ethanol project. *Biofuels international*. 7 août. En ligne : http://www.biofuels-news.com/news/duPont_danisco_project.html, consulté le 7 août 2008.

collaborent et investissent ensemble pour explorer de nouvelles technologies et de nouveaux processus afin d'optimiser la transformation de la paille de maïs en éthanol⁵¹.

L'option cellulosique et le potentiel de la transgénèse

Ceux qui voient dans la paille de maïs (tout comme dans bien d'autres résidus agricoles) un fort potentiel énergétique font cependant face à une première limite au niveau de sa composition en cellulose. La production d'une biomasse végétale n'a jamais constitué un critère d'intérêt pour la culture du maïs, alors que les caractéristiques du maïs ont été historiquement sélectionnées et optimisées pour la production du maïs-grain. De plus, les technologies actuelles de transformation de la cellulose ne permettent pas à ce jour une réelle production commerciale d'éthanol cellulosique. Devant les limites des carburants de 1^{ère} génération, on tente alors, comme nous le verrons par la suite, d'accélérer le développement de ces technologies.

Ainsi, pour accroître la production de la biomasse du maïs, les experts proposent d'augmenter ses rendements en paille par la voie de la transgénèse végétale et par le développement de nouvelles variétés végétales. En outre, Perlack *et al.* (2005), des chercheurs au USDOE et au USDA, soutiennent qu'il serait possible, par ces techniques, d'espérer augmenter les rendements de la paille de maïs de 25% d'ici 2020 et de 50% d'ici 2043, alors que Nealson et Venters (2001), également du USDOE, soutiennent qu'elles pourraient permettre de créer des variétés végétales plus faciles à convertir en éthanol.

Le cas du maïs tropical est un exemple de ce développement. Pour Bant (2007), il s'agirait même de la culture énergétique par excellence pour les États-Unis (« *the ultimate U.S. biofuels crop* »). Cette variété produirait plus de biomasse, 25% plus de sucre et nécessiterait moins de traitements que bien d'autres plantes à l'étude pour la production d'éthanol. En outre, elle aurait une croissance potentielle de plus de quatre mètres (comparativement à environ deux mètres pour les variétés de maïs conventionnelles).

Afin d'arriver à produire 20% de l'ensemble de la consommation de carburant issu de la biomasse d'ici 2030, l'USDOE (2002) appelait, en 2002, à un développement scientifique et technologique

⁵¹ Anonyme. 2008. ADM, Monsanto and Deere to collaborate on corn stover research. *Biofuels international*. 4 septembre. En ligne : http://www.biofuels-news.com/news/adm_monsanto_deere.html,

significatif et continu, en mettant sur pied, dès l'année suivante, le *Biomass Program* qui encourage le développement dans le domaine des biotechnologies du vivant (EERE, 2003). Un des objectifs est alors de stimuler le développement des technologies concurrentielles afin de rendre disponibles les sucres de la biomasse lignocellulosique pour les convertir en carburant. Dans son rapport intitulé *Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol : a joint research agenda*, l'USDOE (2006) souligne que son objectif est d'obtenir le « *maximum usable organic carbon per acre in an environmentally and economically sustainable way* » (p. 57-58), en s'appuyant sur les OGM pour faire de l'option cellulosique un des éléments d'un portfolio de solutions qualifiées étonnamment « *d'environmentally friendly* ».

« Major agricultural crops grown today for food, feed, and fiber in the United States have not been bred for biofuels. Thus, many carefully selected traits in food and feed crops [...] are disadvantageous in biofuel production. A suite of new crops and new varieties of existing crops specifically bred for biofuels and adapted to a range of different soil types and climatic conditions is required » (p. 57).

Koonin (2006), chef scientifique de l'industrie pétrolière BP, affirme que la transgénèse possède des vertus environnementales, parce qu'elle permettrait d'optimiser certaines variétés végétales ou certaines espèces microbiennes responsables de la fermentation et qu'elle permettrait alors de réduire les impacts des intrants agricoles chimiques, tout en augmentant les rendements et la valeur environnementale des cultures destinées à la production d'éthanol. Selon lui,

« Plant development, chemical composition, tolerance of biotic and abiotic stresses, and nutrient requirements are important traits to be manipulated. The combination of modern breeding and transgenic techniques should result in achievements greater than those of the Green Revolution in food crops, and in far less time » (p. 435).

La promesse d'un développement scientifique et technique fait croire à certains que le développement de nouvelles variétés végétales énergétiques rendra possible l'augmentation de l'approvisionnement en éthanol. Comme le suggère Shreeve (2006), à long terme, « *we're limited mostly by our imagination, not by the limits of biology* » (p. 68).

Toutefois, le projet cellulosique, par ccs propos, tient davantage sur un fantasme de développement que sur des données réelles, alors que, comme nous l'avons déjà mentionné et comme en témoigne à nouveau l'étude de Benbrook (2004), ces cultures, déjà pesticides (Séralini, 2005), ont pour effet d'augmenter l'usage de pesticides. Il est somme toute possible de convenir que les techniques agricoles issues de la Révolution verte ont mené à l'augmentation des rendements agricoles, à tout le moins à court terme. Toutefois, on ne peut non plus nier que cette

même révolution agricole a introduit dans l'environnement un volume incroyable de composés synthétiques (engrais, pesticides, herbicides) qui ont aujourd'hui des impacts observables (et d'autres qu'on ne peut encore soupçonner vu le potentiel d'effet synergique entre ces nombreuses molécules) tant sur la santé humaine et sur le monde du vivant.

4.1.2 Le défi technologique du développement des cultures énergétiques cellulosesiques

Le problème au plan de la biomasse végétale correspond essentiellement à l'inaccessibilité de la cellulose qu'elle contient, phénomène nommé la récalcitrance de la biomasse végétale, et à sa difficile conversion en sucre simple et aisément fermentable. Ces deux facteurs constituent les obstacles techniques qui nuisent au développement industriel de la filière cellulosesique. Pour l'instant, comme nous le verrons plus loin, la conversion de la cellulose en éthanol est un processus laborieux et énergivore, si bien que cet éthanol est plus coûteux à produire que les carburants fossiles (USDOE, 2006). Alors que cette conversion est relativement facile dans le cas du maïs, où il suffit d'ajouter un enzyme (une amylase) qui fractionne le polymère d'amidon en plusieurs molécules de glucose, pour être ensuite facilement transformables en éthanol, le processus se complexifie grandement dans le cas des autres parties végétales (tige et feuilles).

La structure de la biomasse végétale

La biomasse végétale se compose essentiellement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine (Kadam et McMillan, 2003; Service, 2007; Spatari, Zhang et Maclean, 2005). En enveloppant la cellulose et l'hémicellulose à travers de fortes interrelations moléculaires, la lignine représente une des premières lignes de défense naturelle de la plante aux assauts des microorganismes (voir fig. A.5), rendant difficile l'accès à la cellulose (Himmel *et al.*, 2007).

Contrairement aux amylases qui transforment aisément l'amidon du maïs en glucose, très peu d'organismes naturels sont capables de convertir la cellulose en sucres simples ou encore directement en éthanol. En outre, bien que certains microorganismes aient la capacité de métaboliser l'hémicellulose, un sucre à cinq carbonnes, le produit final n'est ni directement de l'éthanol, ni au moins du glucose (Johnson *et al.*, 2007 Service, 2007).

De plus, les enzymes qui sont en mesure de participer aux étapes de transformation de la biomasse en éthanol sont fragiles, capricieuses et facilement inhibées par plusieurs substances contenues dans les plantes (Sanderson, 2006). De même, les microorganismes qui sont les plus susceptibles de fermenter directement la cellulose ne sont tolérants qu'à des petites concentrations d'éthanol dans leur milieu.

En outre, la grande variabilité dans l'occurrence de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine, d'une variété végétale à l'autre, représente une autre entrave technique complexifiant la production d'éthanol cellulosique. Par exemple, les microorganismes qui sont en mesure de digérer les sucres de la cellulose en sucre plus simple ne sont pas les mêmes que ceux qui digèrent l'hémicellulose, et réciproquement. Par ailleurs, la composition de la paille de maïs varie fortement en fonction du génotype, du milieu de croissance et de l'interaction entre ces deux paramètres (Sluiter *et al.*, 2000). Par conséquent, Sheehan *et al.* (2003) estiment par exemple que la cellulose représente 37,4% de la biomasse végétale de la paille de maïs, l'hémicellulose, 25,7%, et la lignine, 18%, tandis que McAloon *et al.* (2000) rapportent des contenus de 38% en cellulose et de 32% en hémicellulose. Quoi qu'il en soit, ces variations, d'une variété de maïs à l'autre, seraient suffisantes pour influencer de manière importante les coûts de production d'éthanol, faisant fluctuer les prix de 20 à 25% (Sluiter *et al.*, 2000).

Le défi transgénique de la filière cellulosique

Afin de vaincre cette récalcitrance de la biomasse végétale et ainsi d'augmenter l'efficacité de la bioconversion, d'abaisser les coûts de production et de rendre le procédé commercialement viable, de nombreux scientifiques ont choisi d'explorer la voie leur permettant de concevoir de nouvelles variétés végétales et de nouveaux systèmes microbiens, sans réellement se soucier des impacts d'un tel développement. L'augmentation des rendements passerait alors par l'optimisation du processus de fixation du carbone afin de produire davantage de polysaccharides de structure, comme la cellulose, et moins de lignine.

Différentes voies sont ainsi proposées. Vermerris *et al.* (2007) soutiennent qu'il faut tout d'abord améliorer génétiquement quatre éléments clés, soit altérer la composition biochimique de la plante afin d'en faciliter le traitement, modifier son architecture moléculaire, augmenter sa résistance

aux défis biotiques et abiotiques (e.g. résistance à des maladies, tolérance à la sécheresse, etc.) et augmenter sa production en composantes cellulosiques.

Le contenu en lignine de la plante représente un autre problème technique à résoudre pour les tenants de l'option cellulosique. La lignine représente une nuisance pour les producteurs d'éthanol en ce sens qu'elle empêche les enzymes d'entrer facilement en contact avec la cellulose (Kintisch, 2007). À l'inverse, une diminution de la part de lignine présente dans la biomasse permettrait d'avoir plus aisément accès à la cellulose en facilitant l'étape de l'hydrolyse de la biomasse végétale et de produire ainsi davantage de sucre disponible pour la fermentation, augmentant d'autant plus la « digestibilité » de la biomasse (Ragauskas *et al.*, 2006). Pedersen, Vogel et Funnell (2005), ainsi que Vogel et Jung (2001), rapportent des manipulations de la voie de synthèse de la lignine qui ont permis de diminuer sa concentration dans le maïs. De son côté, Hu *et al.* (1999) rapportent avoir procédé à des modifications génétiques chez des peupliers et avoir observé une diminution de 50% de la production de lignine et une augmentation du contenu en cellulose. L'augmentation subséquente de cellulose aurait des effets positifs sur la productivité de la culture énergétique en permettant à davantage de cellulose d'être convertie en glucose fermentable. Toutefois, rien n'indique que de telles transformations dans la structure fondamentale de ces variétés végétales n'aient pas, à plus ou moins long terme, d'impacts par exemple en ce qui concerne son port vertical lorsqu'on sait notamment que la lignine joue un rôle très important en tant qu'élément structurel de maintien.

Himmel *et al.* (2007) suggèrent également de retravailler l'ingénierie des parois cellulaires de sorte qu'elles soient plus facilement dégradables par des enzymes, elles-mêmes conçues expressément pour ce rôle. On parle alors de plantes génétiquement modifiées pouvant être plus facilement fermentables (*designed for deconstruction*) par des microorganismes également modifiés génétiquement : « *New generations of hydrolytic enzymes will function near their theoretical limits, and energy plants will be modified to serve as improved substrates for these new generation enzymes* » (p. 807).

Johnson *et al.* font état de modifications chez les bactéries *Escherichia coli* et *Zymomonas mobilis* pour qu'elles puissent transformer la cellulose et l'hémicellulose en éthanol tandis que Kintisch évoque des microorganismes contenus dans le système des termites *Coptotermes formosanus* qui,

bien qu'ils soient peu tolérants à la présence d'éthanol dans leur milieu, sont capables de dégrader la cellulose (Kintisch, 2006).

Pour l'instant au Canada, les études porte plutôt dans une autre direction alors que Yemshanov et McKenney (2008) étudient des peupliers à croissance rapide et que Labrecque et Teodorescu (2005) travaillent sur la production de biomasse à partir de différentes variétés de saules (*Salix sp.*) et de peupliers (*Populus maximowiczii* x *P. nigra*) dans le but de produire de l'éthanol à partir de la cellulose forestière.

En cherchant ainsi à avoir accès à la cellulose, c'est l'ensemble de la biomasse végétale qui devient un carburant potentiel. Plus la biomasse produite est importante, plus le volume de carburant produit sera important. Dans le cas du maïs, bien que l'important volume de résidus agricoles aux ÉU fait planer l'idée d'une production d'éthanol considérable, les problèmes des coûts de conversion ne sont toujours pas encore résolus, ni ceux des sols dénudés contribuant à accélérer davantage encore l'érosion des sols.

Les investissements nécessaires afin de parer à ces problèmes risquent donc d'être très importants. La production d'éthanol cellulosique, à partir de la paille de maïs ou d'autres sources végétales, n'est pas à ce jour concurrentielle, comparée aux coûts de production de l'essence, voire ceux des carburants végétaux de 1^{ère} génération. S'il faut en croire Wyman (2007) ainsi que Solomon, Barnes et Halvorsen (2007), les avancées technologiques pourraient suffisamment faire baisser les coûts de production pour rendre l'option cellulosique économiquement rentable. Le litre, qui coûterait actuellement entre 0,80 et 1,05 \$US à produire, pourrait ainsi être réduit, comme l'espère l'USDOE, à 0,28 \$US d'ici 2012 (Service, 2007).

Il demeure toutefois que la mise en œuvre de ces procédés n'est toujours pas possible. L'UNESCO (2008) estime d'ailleurs que cette production ne sera pas réellement exploitable à échelle commerciale avant cinq à dix ans. De plus, à l'instar de la production d'éthanol-maïs, il n'est pas certain que cette production d'éthanol cellulosique, faisant en quelque sorte planer une possible transformation de l'ensemble du monde végétal en carburant potentiel, ne cache pas des coûts environnementaux, sociaux et sanitaires, beaucoup plus importants que les bénéfices énergétiques et environnementaux qu'elle promet.

4.2 LA PRODUCTION D'ÉTHANOL-MAÏS CELLULOSIQUE

4.2.1 Le bilan de gaz à effet de serre de l'éthanol-maïs cellulosique

À l'instar de l'éthanol-maïs, l'éthanol de paille serait un carburant produisant moins de GES que les carburants fossiles, et plusieurs auteurs soulignent son potentiel de réduction d'émissions de GES par rapport à l'essence (Bastianoni et Marchettini, 1996; Berndes *et al.*, 2001; De La Torre Ugarte, 2005; Farrell *et al.*, 2006; Kim et Dale, 2005b; Spatari, Zhang et Maclean, 2005; von Blottnitz et Curran, 2007; Wang, 2005). Le gouvernement canadien soutient que l'utilisation d'un mélange E10 fabriqué à partir de matière cellulosique agricole permettrait de réduire de 6 à 8% les émissions de GES par rapport à l'essence (Canada, 2007f). Ainsi, en tenant compte des principaux GES (CO₂, CH₄, N₂O) émis par sa production et son usage, l'éthanol-maïs cellulosique permettrait de réduire les impacts du transport sur les changements climatiques⁵². En tenant compte du cycle de vie de l'éthanol-maïs cellulosique, Sheehan *et al.* (2003) estiment même que ses émissions des GES seraient 113% plus faibles que celle de l'essence, alors que Spatari, Zhang et Maclean (2005) les estiment à, 65% et Wang (2005), à 85% de celles de l'essence.

Ces différences s'expliquent en partie par le choix des critères d'analyse utilisés, tout particulièrement au niveau des étapes du cycle de vie du carburant ou du type de mélange-carburant étudié. Par exemple, certains, comme Kim et Dale (2005b), vont considérer que le retrait des champs des résidus de la culture du maïs permet de réduire les émissions de GES. En retirant la tige et les feuilles de maïs du champ, on réduirait également le retour en azote et en carbohydrates qui les composent au sol, éléments qui ne seraient alors plus disponibles dans le sol pour l'activité microbienne et les processus de nitrification et de dénitrification, réduisant la formation de N₂O et sa libération vers l'atmosphère. En outre, tout comme le font Farrell *et al.* (2006) dans leur modélisation, certains appuient une partie de leur estimation sur un développement technologique futur qui, malgré toutes les bonnes volontés possibles, reste fondamentalement aléatoire comme indicateur et dénote un débordant optimisme devant les « progrès de la technique ».

⁵² Rappelons à nouveau que le CH₄ et le N₂O ont des effets respectivement de ~20 et ~300 fois plus importants que le CO₂ (Bellarby *et al.*, 2008; von Blottnitz et Curran, 2007).

Quelques études récentes suggèrent toutefois quelques réserves face à ces propos enthousiastes. Blanco-Canqui et Lal (2007) rapportent ainsi que plus la récolte de l'ensemble des parties aériennes du maïs est importante, plus les émissions de CO₂ libérées par le sol seront également importantes. En ce sens, la quantité de paille de maïs recueillie devient alors l'enjeu de la production d'éthanol à partir des résidus agricoles. Les rendements, tant de maïs-grain que de paille, tendent aussi à diminuer avec le temps, plus le retrait de la paille est important, notamment en raison de la diminution du COD (carbone organique dissout) dans le sol. De leur côté, Tilman, Hill et Lehman (2007) soutiennent que « *harvest and use of corn stover [...] to power ethanol plants would likely cause soil organic carbon levels to fall, and increase both carbon dioxide release* » (p. 1567). Khan *et al.* (2007) rapportent une diminution du COD dans le sol par l'utilisation intensive à long terme d'importantes quantités d'engrais azotés, nécessaire à la culture du maïs, entraînant des effets négatifs sur le potentiel des sols à séquestrer le carbone, diminuant tout autant le rôle de puits de carbone qu'on leur donne dans la lutte aux changements climatiques.

Trop peu d'études, à ce jour, ont été menées sur la question pour être en mesure de tracer le bilan clair des GES de l'éthanol-maïs cellulosique. Paradoxalement, si l'on se fie aux études proposées plus haut, il semble que nous ayons à faire à la fois à un carburant qui permette d'abaisser significativement les émissions de GES associées aux transports, à la fois à une culture qui fait augmenter ces mêmes émissions en provenance du secteur de l'agriculture. En outre, les études ne font pas mention des éléments de la chimie de l'éthanol, alors qu'aucune ne remarque, comme cela fut le cas pour l'éthanol issu de la culture du maïs, les nombreux composés volatiles (PAN, O₃, etc.) liés à la combustion de l'éthanol dans le moteur (voir sect. 3.1.1) et leurs impacts potentiels sur la santé, de même que des différences de densité énergétique entre l'éthanol et l'essence.

4.2.2 La valeur énergétique de l'option cellulosique

La culture de la paille de maïs et l'ensemble de son processus de conversion en éthanol exigent un apport énergétique certain, tout comme pour les autres carburants végétaux. Or, nous le verrons, très peu d'études ont évalué à ce jour sa valeur énergétique, alors que les estimations produites

sont encore une fois intimement liées aux différents critères que les chercheurs ont choisi d'intégrer ou non dans leurs analyses.

La plupart des quelques recherches qui tentent de déterminer la valeur énergétique à l'éthanol-maïs cellulosique estiment que ce carburant fournit plus d'énergie qu'il n'en faut pour le produire. Au tableau 4.2, nous avons réuni de manière synthétique différentes valeurs de rendements énergétiques estimées de l'éthanol-maïs cellulosique, auquel on attribue généralement un gain énergétique, par rapport à sa production, d'environ 5 fois (chez Hammerschlag, 2006) à 10 fois (chez Greene, 2004) plus important qu'à l'éthanol-maïs.

Tableau 4.2 Rendements énergétiques comparés de l'éthanol-maïs cellulosique et de l'éthanol-maïs dans la littérature scientifique

Études	Rendement énergétique	
	Éthanol-maïs cellulosique	Éthanol-maïs
(Greene, 2004)	10,00	-
(Farrell <i>et al.</i> , 2006)	8,30	
(Hammerschlag, 2006)	de 6,60 à 4,40	1,30
(von Blottnitz et Curran, 2007)	5,20	1,30
(Pimentel et Patzek, 2005)	*0,69	0,78

* Il s'agit d'une valeur attribuée au *P. virgatum*

Hill *et al.* (2006) soutiennent que l'utilisation des résidus agricoles du maïs, au lieu d'énergie fossile, permettrait d'améliorer significativement le BEN de l'éthanol-maïs. Lavigne et Powers (2007), ainsi que Farrell *et al.* (2006), attribuent un BEN positif à l'éthanol issu de la paille de maïs, environ 4 fois plus importants que celui qu'ils attribuent à l'éthanol-maïs (respectivement 22,9 et ~23 MJ/L comparativement à 5,9 et 4,8MJ/L ; voir tabl. 3.1). Sans lui attribuer de valeur, Hill (2007) présume néanmoins que l'éthanol dérivé de la paille de maïs porte intrinsèquement un gain énergétique supérieur à celui de l'éthanol-maïs.

Tout comme pour l'éthanol-maïs (voir sect. 3.1.2), l'éthanol-maïs cellulosique possède une densité énergétique de 30% à 35% plus faible que celle de l'essence (Canada, 2003b ; Sheehan *et al.*, 2003). Sheehan *et al.* (2003) évaluent que l'éthanol-maïs cellulosique, dans un mélange E85, ne consommerait que 0,715 MJ/Km d'énergie non renouvelable, comparativement à 3,63 MJ pour l'essence et à 2,45 MJ pour l'éthanol-maïs (Sheehan *et al.*, 2003), ce qui aurait pour effet de

compenser la plus grande consommation de carburant. Selon ces mêmes auteurs, rouler à l'éthanol-maïs cellulosique pur (E100) réduirait de 95% la consommation d'énergie fossile par kilomètre.

Seuls Pimentel et Patzek (2005) attribuent à l'éthanol cellulosique un déficit énergétique, pour ce qui est du cas d'une culture pérenne de *P. virgatum* où le rendement énergétique serait de 0,69. En tenant compte des technologies actuelles de conversion et de l'ensemble des sources énergétiques nécessaires à cette conversion, ils estiment également que le rendement énergétique de l'éthanol de paille serait encore plus faible que celui de l'éthanol-maïs, alors que 50% d'énergie additionnelle serait nécessaire pour produire un litre d'éthanol cellulosique par rapport à un litre de pétrole (Pimentel et Patzek, 2006). Ces auteurs considèrent certaines externalités supplémentaires, telle l'énergie nécessaire pour construire la machinerie agricole et bâtir les distilleries. En prenant en compte les effets de conversion et de changements d'utilisation des terres décrits par Searchinger *et al.* (2008), notamment l'augmentation des émissions de GES et des mesures mises en place afin de lutter contre les impacts de ces hausses, le déficit énergétique devrait être encore beaucoup plus important.

4.2.3 Une énergie renouvelable

À nouveau et à l'instar de l'éthanol-maïs, l'éthanol-maïs cellulosique est communément considéré comme une énergie renouvelable. Aux ÉU plus particulièrement, par l'importance de la culture du maïs, sa grande disponibilité et sa forte concentration en cellulose, elle serait, comme le soutiennent Hoskinson *et al.* (2007), « *a significant source of environmentally sound, sustainable and renewable fuels* » (p. 126). Robert D. Perlack et les autres chercheurs des USDOE et USDA (Perlack *et al.*, 2005) estiment que les végétaux possèdent un immense potentiel permettant de subvenir à la demande énergétique future des ÉU, alors que l'énergie issue des végétaux pourrait être vue, écrivent-ils, comme « *the largest domestic source of renewable energy [...] particularly attractive because it is the only current renewable source of liquid transportation fuel* » (p. i). Cette même USDOE (2006) soutient également que les résidus agricoles, tout particulièrement pour la paille de maïs, sont nettement sous-utilisés. Pour leur part, Varvel *et al.* (2008) soulignent que « *renewable energy from plant biomass has the potential to replace fossil fuels as a source of liquid fuels* » (p. 18). Malgré ces commentaires enthousiastes à propos de l'option cellulosique, il

reste tout de même à savoir dans quelle mesure cette énergie peut ainsi être considérée comme renouvelable, alors même que peu d'études ont tenté d'évaluer le caractère renouvelable de l'éthanol de paille.

Deux études évaluent le cycle de vie de l'éthanol-maïs cellulosique. Spatari, Zhang et Maclean (2005), en s'appuyant principalement sur son potentiel de réduction de GES, estiment que l'éthanol de paille est une option viable. Kim et Dale (2005b) mettent par ailleurs en évidence que l'éthanol-maïs cellulosique aurait à la fois de nombreux bénéfices et de nombreux impacts sur l'environnement. Malgré des crédits d'impacts environnementaux (en termes de réduction d'émissions de GES et de consommation d'énergie non renouvelable), sa production accélérerait tout particulièrement des phénomènes d'acidification et d'eutrophisation des eaux.

Les résidus agricoles de la culture du maïs sont pourtant généralement considérés comme une source abondante de biomasse que l'on peut retirer du champ, sans pour autant causer d'effets sur la productivité du sol lorsque de bonnes méthodes agricoles sont appliquées (Kim et Dale, 2004; Wilhelm *et al.*, 2004), alors que quelques études rapportent même avoir observé une augmentation des rendements agricoles (Kaspar, Erbach et Cruse, 1990; Swan *et al.*, 1994). D'autres études récentes soutiennent plutôt que le retrait du champ d'une partie ou de la totalité des résidus du maïs entraîne une diminution significative des rendements du maïs-grain et de la paille (Blanco-Canqui *et al.*, 2006 et 2007; Linden, Clapp et Dowdy, 2000; Power *et al.*, 1998; Varvel *et al.*, 2008). Varvel *et al.* (2008) soutiennent que les rendements annuels de maïs et de ses résidus diminuent significativement lorsqu'on récolte la moitié des résidus. Ainsi laissés aux champs, ils sont davantage bénéfiques à la culture du maïs. Blanco-Canqui et Lal (2007) rapportent une diminution de 15% et de 30% des rendements du maïs-grain pour des récoltes de 50% et de 100% de la paille de maïs alors qu'une récolte entière provoque une diminution de 20% des rendements de la paille pour l'année suivante.

Il est alors important d'être critique quant à l'utilisation des résidus de culture, comme la paille de maïs, tout particulièrement à cause de leurs effets sur la qualité des sols. Comme le souligne Lal (2005), il existerait d'un côté une relation directe entre la quantité de résidus laissés aux champs et les contenus des sols en matière organique, et de l'autre, une relation entre les contenus des sols en matière organique et les rendements des cultures. Malgré le fort potentiel de production

d'énergie⁵³, l'utilité des résidus de culture reste plus importante aux champs, alors que ces résidus participent au maintien et à l'augmentation de la qualité des sols. Ils le font par leur apport en carbone, par l'augmentation de l'activité biologique des sols et de la diversité de sa flore microbienne, par leur contribution à la rétention des sols et la prévention de l'érosion et du lessivage, par la protection des sols aux effets de la pluie, et par la réduction de l'évaporation. Ils contribuent également à tempérer les propriétés thermiques du sol, permettent un recyclage des nutriments et diminuent la nécessité de l'ajout d'intrants de synthèses (e.g. engrais) (Lal, 2005; Wilhelm *et al.*, 2004).

Ceux qui nous mettent en garde contre cette option posent d'abord l'enjeu de la pérennité des rendements agricoles des cultures de maïs par la récolte de ses résidus. L'option cellulosique, en réponse à la croissance des besoins énergétiques et aux nouvelles orientations gouvernementales en matière d'énergie renouvelable qui ciblent d'importants objectifs de production, risque toutefois de se faire à travers une production de type industrielle mono-ressource qui commandera de grands volumes uniformes de biomasse végétale à transformer. Parce qu'elle présente de nombreux avantages sur les autres formes de biomasses végétales potentielles, dont notamment ses grands volumes actuellement disponibles aux ÉU, la paille de maïs est une des ressources qui sera nettement privilégiée. Laissé aux champs, le couvert de résidus agricoles rend toutefois des services environnementaux et agricoles non négligeables. La diminution de la capacité des sols à séquestrer le carbone par le retrait de son couvert végétal aura davantage d'effets sur les changements climatiques que de rouler à un carburant que l'on étiquette, à tort, de renouvelable. Qu'est-ce qui est renouvelable dans cette énergie s'il s'avère vrai, comme Pimentel et Patzek (2005, 2006) le soutiennent, qu'il faut au final plus d'énergie fossile non renouvelable que l'énergie produite? En outre, comme nous l'explorerons par la suite, le maintien de la qualité des sols et des rendements agricoles ne sont-ils pas également des éléments clés lorsqu'il est question d'agriculture, de sécurité énergétique et de sécurité alimentaire?

⁵³ Selon cet auteur, 487,9 millions de tonnes de résidus auraient été produites en 2001 aux ÉU. Leur transformation en éthanol correspondrait potentiellement à l'équivalent de 156,16 milliards de litres de pétrole. De cela, 75% provient de la culture des céréales et 49% pour la seule culture du maïs (241,5 millions de tonnes).

4.3 LES CONSEQUENCES SOCIO-ENVIRONNEMENTALES POTENTIELLES DE L'OPTION CELLULOSIQUE

Les partisans de l'option cellulosique voient très certainement en elle une réponse à la crise énergétique et à la crise climatique. Si certains la considère comme une voie complémentaire aux carburants de 1^{ère} génération dans la quête d'une alternative à l'or noir, plusieurs la considère comme l'alternative même aux carburants de 1^{ère} génération et aux conséquences socio-environnementales qui leur sont associées. Elle permettrait notamment d'éviter le conflit d'usage pour la terre entre cultures alimentaires et cultures énergétiques, un conflit participant à la crise alimentaire actuelle.

Certains mettent toutefois en doute les bénéfices annoncés des carburants de 2^{ème} génération, notamment en ce qui a trait aux impacts environnementaux de sa production. Palmer (2007) énonce par exemple trois raisons pour lesquelles il faudrait se méfier davantage de cette option. Selon lui, les besoins énergétiques importants de nos sociétés i) exigeront un grand volume de biomasse végétale à transformer, inévitablement produite par des monocultures intensives, et ii) ne reposeront seulement que sur quelques variétés biologiques. De plus, iii) l'optimisation de l'étape de la conversion de la cellulose, à travers les biotechnologies, risque de mettre en péril l'intégrité d'une part du règne végétal. Lal (2005) ajoute que l'option cellulosique, s'appuyant sur la réutilisation des résidus agricoles, placera nécessairement en compétition leurs nombreuses utilisations actuelles et les services écologiques qu'ils rendent (*voir* fig. A.6)⁵⁴. Il nous reste également à voir si l'option cellulosique en gestation saura répondre, même en partie, aux – énormes – besoins énergétiques, sans pour autant participer, comme le font actuellement les carburants de 1^{ère} génération, à la crise alimentaire mondiale.

Cette section se construit sur la synthèse des risques socio-environnementaux de l'option cellulosique, présentés dans la littérature scientifique. Cependant, nous n'avons trouvé aucune étude qui abordait, d'un point de vue d'ensemble, les effets d'une mise en production commerciale de la voie cellulosique. Les impacts sur la fertilité des sols, sur les rendements agricoles et sur la biodiversité sont les effets les plus généralement rapportés dans la littérature. Notons que dans le cas de l'utilisation des résidus de la culture du maïs pour la production

⁵⁴ Nous avons mis en Annexe une figure de Lal (2005) résumant les impacts du retrait des champs des résidus agricoles (pour la production de carburant et pour d'autres usages).

d'éthanol, les conséquences de la culture du maïs (énoncées au chap. 3) doivent également être prises en compte.

4.3.1 La récolte des résidus agricoles, l'érosion et la dégradation des sols

On rapporte que la récolte de la paille de maïs a des effets sur la fertilité des sols. Même ceux qui estiment qu'il serait possible de récolter de manière soutenable de 60 à 70% de la paille (Graham *et al.*, 2007; Perlack *et al.*, 2005), voire jusqu'à 90% (Greene, 2004), le mentionnent. La part de résidus laissée au sol permet en fait de recycler et de redonner au sol les macro-nutriments et le carbone nécessaires pour assurer sa fertilité. Johnson *et al.* (2007) rapportent que la récolte de la paille de maïs entraîne des effets négatifs sur le taux de COD dans le sol et sur son contenu en nutriments et en eau. Le retrait de la paille diminue le recyclage naturel des nutriments et l'intrant de carbone, réduisant par conséquent le taux de COD dans le sol (Follett, 2001). Allmaras, Linden et Clapp (2004) chiffrent cette diminution de COD à 20% lorsque l'on récolte l'entièreté des résidus.

Le rôle du COD dans le sol est très important pour la fertilité et la productivité des sols. Il a notamment des effets sur ses propriétés physiques et chimiques (e.g. le pH), sur la disponibilité des nutriments, sur les échanges ioniques, sur sa structure hydraulique et sur la présence des microorganismes (Wilhelm *et al.*, 2004). La plupart des caractéristiques des sols productifs sont ainsi liées à de hautes teneurs en COD. À l'inverse, une diminution du taux de COD dans le sol aura des effets néfastes sur sa productivité et, par conséquent, sur les rendements agricoles des cultures qui s'y font. Les cultures intensives, qui ont cours par exemple dans le *U.S. Corn Belt*, ont déjà conduit à la perte du carbone par l'érosion et par la diminution de l'apport en matières organiques (Follett, 2001). Blanco-Canqui et Lal (2007) rapportent que le retrait de plus de 25% de la paille réduit fortement les taux de COD dans le sol, altère ses propriétés physiques, affecte négativement sa faune et diminue les rendements des cultures. Ainsi, en plus d'affecter ses rendements en biomasse, le retrait de la paille influence aussi négativement les rendements du maïs-grain (Mann, Tolbert et Cushman, 2002; Wilhelm *et al.*, 2004). Aux faibles taux de COD présent dans le sol correspondent alors de bas rendements.

De plus, le retrait du couvert végétal accélère encore davantage l'érosion des sols provoquée par la culture du maïs. Wilhelm *et al.* (2007), ainsi que Mann, Tolbert et Cushman (2002), rapportent que le couvert de paille de maïs est le facteur le plus important afin de prévenir l'érosion par le vent et par l'eau. Selon Pimentel et Lal (2007), les terres agricoles aux ÉU ne peuvent soutenir une production d'éthanol à partir des résidus agricoles. L'agriculture nationale perdrait dix fois plus rapidement ses terres arables qu'elle n'est en mesure de les régénérer. De manière générale, la productivité des cultures décline continuellement à mesure que l'érosion fait perdre aux terres cultivables leur couche de terres arables et que les résidus sont retirés des champs (Al-Kaisi et Guzman, 2007; Wilhelm *et al.*, 2004). Elle aurait déjà perdu le tiers de ses terres arables et ne pourrait donc pas, prise dans leur ensemble, supporter l'intensification de cultures exigeantes comme celle du maïs : laisser les sols à nu, en les privant en totalité de leur couvert végétal de résidus agricoles, accélérerait encore par dix leur érosion (Pimentel et Patzek, 2006).

L'augmentation de l'érosion a aussi des conséquences sur la qualité des eaux. Mann, Tolbert et Cushman (2002) rapportent que l'augmentation de l'érosion, due au retrait de la paille, et l'ajout d'engrais pour y pallier risquent d'accroître les effets du lessivage des herbicides, des pesticides et de l'azote du sol sur les eaux de surface et souterraines. Pour Kim et Dale (2005b), sans la mise en place de nouvelles mesures agricoles telles que l'usage de cultures hivernales, l'utilisation de cette biomasse risque d'accroître les phénomènes d'acidification et d'eutrophisation liés à la présence d'azote et de phosphore dans l'eau.

Mann, Tolbert et Cushman (2002) soulignent aussi que le retrait du couvert de paille de maïs augmente de manière significative le taux de stress hydrique et entraîne un moins bon contrôle des maladies et des ravageurs qui affectent les cultures. L'augmentation des cultures énergétiques celluloseuses sur des terres dites marginales ou dégradées accentuera de manière importante l'usage de pesticides et d'herbicides (Paul et Ernting, s.d.). La diminution de la productivité du sol risque aussi d'accroître l'utilisation d'intrants visant à maintenir les rendements agricoles. Rappelons que la culture du maïs nécessite déjà de grandes quantités d'intrants azotés. À court terme, les pertes en nutriments, dues à leurs « non-recyclages » et à l'érosion, devront être compensées par l'augmentation des intrants azotés, de phosphore, de calcium et de magnésium (Al-Kaisi et Guzman, 2007). Pimentel *et al.* (1995) soulignent également que les effets de l'érosion pourront être atténués temporairement par plus d'engrais et par les techniques agricoles. C'est donc dire que la maximisation de l'utilisation des résidus risque de participer à la baisse de

la fertilité des sols et des rendements agricoles, par l'élimination du couvert végétal, la mise à nu du sol et la diminution du recyclage des nutriments. À long terme, ces nutriments seraient ainsi exclus complètement et de manière permanente du système, nécessitant l'ajout d'intrants pour supporter les cultures. Toutefois, la dégradation des sols, provoquée par les pertes progressives de matière organique, de faune microbienne et de capacité à retenir l'eau, ne pourra être compensée par aucune intervention. Alors, comme le questionne Burt (2006), la paille de maïs doit-elle être considérée comme un produit agricole sous-utilisé? Les résidus semblent jouer un rôle important en ce qui concerne le maintien des écosystèmes agricoles actuels. Leur récolte aurait alors d'importantes conséquences, tant en termes de dégradation des sols qu'en termes de baisse des rendements agricoles.

4.3.2 La pression sur les écosystèmes naturels

La récolte de la paille de maïs accroît la pression exercée par la culture du maïs sur les écosystèmes. Comme il a été déjà fait mention, l'expansion de cette culture exerce des pressions quant à la mise en production de terres agricoles supplémentaires, exerçant alors des pressions accrues sur les forêts et les prairies (Pimentel, Patzek et Cecil, 2007; Righelato et Spracklen, 2007). En accentuant le phénomène d'érosion, le retrait de la paille met aussi directement en péril la permanence et la qualité de la faune des sols agricoles (Al-Kaisi et Guzman, 2007; Allmaras, Linden et Clapp, 2004; Blanco-Canqui et Lal, 2007; Burt, 2006; Pimentel *et al.*, 1995). La dégradation actuelle de la qualité des sols agricoles exercera par conséquent une mise en production de terres qui n'étaient jusque-là pas vouées à l'agriculture.

Si le développement de la filière cellulosique devait passer par l'utilisation des résidus agricoles du maïs, à cause de sa très grande disponibilité, cela affecterait encore davantage les écosystèmes aquatiques, tout particulièrement dû à l'érosion additionnelle provoquée par le retrait de la paille (Mann, Tolbert et Cushman, 2002). À titre d'exemple, l'étude de Donner et Kucharik (2008) montre que l'augmentation aux États-Unis de la production d'éthanol à 136 milliards de litres d'ici 2022 (dont ~80 milliards en provenance majoritairement de la filière cellulosique) ferait augmenter de 24% le flux d'azote dans les fleuves Mississippi et Atchafalaya uniquement pour la filière cellulosique et de 34% si l'on y ajouterait les effets de la filière de l'éthanol-maïs. Un tel

accroissement augmenterait alors de façon très significative les périodes d'hypoxie dans le golfe du Mexique.

Outre le volet des résidus agricoles, le USDOE (2006) souligne que l'option cellulosique pourra aussi être produite par des cultures pérennes telles que *P. virgatum* et *Miscanthus sp.* Afin d'éviter les conflits d'usage entre cultures alimentaires et cultures énergétiques, celles-ci seraient mises en exploitation sur des terres qui ne sont pas destinées aux cultures alimentaires : « *on marginal, excess, or surplus agricultural lands* » (p. 60). Le changement de vocation des terres dégradées ou marginales transformera très certainement les écosystèmes naturels locaux, chassant certaines espèces animales et végétales au profit de d'autres. Néanmoins, la faible diversité des cultures énergétiques risque d'uniformiser et de diminuer la biodiversité en place. Raghu *et al.* (2006) préviennent aussi du danger de l'introduction d'espèces envahissantes en tant que cultures énergétiques potentielles. Des cultures industrielles non indigènes ont déjà montré qu'elles étaient capables d'échapper à leur zone spécifique de culture et de se développer au détriment des autres espèces indigènes (Kantha, 2006). Ils mentionnent notamment que *P. virgatum* et *Miscanthus sp.* sont deux espèces végétales fortement envahissantes. Le contrôle de ces cultures énergétiques pérennes, très prometteuses pour la production d'éthanol selon certains, nécessiterait l'usage d'herbicides ou encore l'introduction d'ennemis spécifiques naturels. Ces deux options sont généralement évitées à cause de leurs coûts environnementaux et économiques potentiels, notamment en raison du risque d'un passage de l'insecte prédateur aux cultures commerciales et alimentaires locales, comme le maïs, le blé, le coton, etc.

Quoi qu'il en soit, les différentes sources de l'option cellulosique (résidus agricoles, cultures pérennes, sylvicultures et résidus forestiers), associées à une demande énergétique croissante, continueront d'exercer une forte pression sur le monde vivant (Dukes, 2003; Giampietro, Ulgiati et Pimentel, 1997). Parce qu'une production commerciale requiert de grands volumes de biomasse et que l'éthanol cellulosique nécessite une source uniforme de biomasse, en raison des différents contenus en cellulose, en hémicellulose et en lignine d'une variété végétale à l'autre, l'option cellulosique se traduira par des monocultures exigeantes et destructrices pour l'environnement (Palmer, 2007). Selon Palmer, « *Such monocultures are unlikely to be sustainable* » (p. 897). Solomon, Barnes et Halvorsen (2007) soulignent que la production d'éthanol cellulosique n'est

seulement envisagée qu'à partir de quelques variétés végétales⁵⁵. Ajoutons à cela que les subsides et les incitatifs gouvernementaux, accordés aux ÉU pour la production d'éthanol cellulosique, encouragent les agriculteurs à troquer leurs cultures pour d'autres, comme celle du maïs faisant miroiter deux productions à la fois (à la fois alimentaire et énergétique ou uniquement énergétiques).

Dukes (2003) estime que remplacer l'utilisation des énergies fossiles par des énergies renouvelables d'origine végétale nécessitera l'utilisation de 22% de la PPN terrestre – c'est-à-dire de l'énergie solaire emmagasinée par les plantes sous la forme de biomasse. Cela équivaldrait à accroître d'environ 50% l'appropriation actuelle de l'être humain sur les ressources végétales de la planète. Indirectement, l'espace disponible pour les autres espèces végétales, celles qui n'ont pas d'usage comme tel, diminuera d'autant. L'appropriation anthropique de la PPN accentuera la pression sur les autres espèces avec lesquelles nous partageons actuellement l'usage de cette biomasse, tout particulièrement les espèces animales. Comme le soulignent également Righelato et Spracklen (2007), l'intensification des cultures, à travers l'usage des résidus agricoles, les cultures énergétiques pérennes et la sylviculture énergétique, ne diminuera pas la pression exercée quant à l'usage de la terre. La conversion des écosystèmes naturels en plantations énergétiques mettra alors en péril les services environnementaux qu'ils fournissent, comme le maintien de la biodiversité, la régulation régionale du climat, la prévention de la diversification et l'approvisionnement en diverses ressources forestières et alimentaires.

4.3.3 Les organismes génétiquement modifiés et l'intégrité de la biodiversité.

Compte tenu de la forte demande énergétique et de l'optimisation de certains caractères végétaux spécifiques à la production d'éthanol, l'usage des résidus agricoles pour la production d'éthanol ne risque-t-il pas de provoquer une spécialisation des cultures et d'ainsi perpétuer la compétition des cultures alimentaires et énergétiques? En maximisant la production de la cellulose en ce qui concerne la paille de maïs, n'en fait-on pas alors une culture en soi plutôt qu'un usage alternatif

⁵⁵ « For instance, it can be made from tree species such as hybrid poplar, willow, silver maple and black locust; wood residues including chips and sawdust; construction site residues, municipal residues (MSW), paper and sewage sludge; corn stover, corn and sugarcane processing residues; cereal straws such as wheat, oat, barley and rice; and grasses such as switchgrass, sorghum, reed canary grass, and miscanthus. » (Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007, p. 417).

de résidus agricoles qu'on cherche à valoriser? Déjà, certaines variétés de maïs, comme le maïs tropical, ne sont cultivées que pour leur biomasse (Bant, 2007). Podersimo *et al.* (2005) rapportent également qu'il existe une variation temporelle significative dans les concentrations de cellulose et de lignine dans la paille du maïs tout au long de la saison de croissance. Notamment, les taux de lignine sont à leur sommet peu avant la maturation des grains, rendant alors plus complexe la disponibilité de la cellulose. Cette forte présence de lignine rend très certainement plus intéressante une récolte hâtive de la paille, avant la maturation du fruit, ce qui éliminerait, dans ce cas précis, toute perspective de récolte du grain.

Nous avons précédemment rapporté (sect. 4.1.2) que le développement de l'option cellulosique passe par la voie de la transgénèse végétale. Par contre, leurs conséquences à long terme sur les écosystèmes et la biodiversité ont encore très peu été étudiées (Hill, 2007). On sait toutefois qu'il existe de nombreux cas de problèmes de bioconfinement pour des gènes introduits de certaines cultures alimentaires, notamment les cas du maïs-Bt (Andow, Lövei et Arpaia, 2006) ou encore du canola génétiquement modifié (Rieger *et al.*, 2002). GenewatchUK (2008) rapporte 165 cas, entre 1997 et 2007, de contamination génétique à travers le monde. De ces cas, 67 ont été le fait de cultures expérimentales de variétés OGM non commercialisées. C'est au ÉU que l'on répertorie le plus grand nombre d'incidents et c'est du maïs que provient le plus grand nombre de cas de contamination. En ce sens, le développement de nouvelles variétés végétales conçues pour la production de carburant ou encore la création de microorganismes capables de digérer la cellulose représentent un inconnu de taille quant à leurs impacts potentiels sur l'intégrité de la biodiversité.

Pour la production d'éthanol cellulosique à partir du maïs, la principale modification sera de développer des variétés de maïs à plus faible teneur en lignine (Pedersen, Vogel et Funnell, 2005; USDOE, 2006; Vogel et Jung, 2001)⁵⁶. La dissémination de ces caractères dans notre environnement pose très certainement des risques potentiels tant pour l'environnement que pour l'agriculture et la santé humaine.

La lignine est un important polymère structurel, jouant également un rôle significatif dans le système de défense naturel des organismes végétaux supérieurs face aux pathogènes et aux

⁵⁶ Comme nous l'avons mentionné à la section 3.2.3, le maïs est déjà en Amérique du Nord une des plus importantes cultures d'OGM.

ravageurs. En ce sens, la suppression ou la diminution de la biosynthèse de la lignine risque sans doute d'affaiblir la ligne de défense naturelle des végétaux génétiquement modifiés, mettant conséquemment les cultures génétiquement modifiées – de même que les cultures conventionnelles contaminées – en péril face aux maladies et aux ravageurs, augmentant par la même occasion la nécessité d'un usage accru de pesticides pour le contrôle des ravageurs.

Stewart (2007) met en garde contre l'introduction des OGM dans l'alimentation humaine et animale par l'usage de cultivars permettant d'augmenter les rendements des résidus agricoles. Selon lui, « *genetic modification of a food crop for industrial purposes poses biosafety and regulatory issues that might be irreconcilable* » (p. 284). Palmer (2007) énonce par ailleurs la possibilité que la recherche de la transformation de la structure membranaire, afin d'augmenter la présence de cellulose au détriment de la lignine, ne mène à des défaillances structurelles de la cellule, ou encore à des sensibilités à certains pathogènes dont la variété initiale était résistante. Niven (2005, p. 547) ajoute par ailleurs que le « *development of ethanol-from-cellulose technology therefore involves a significant risk of dramatic – and irreversible – changes to global biodiversity* ».

D'autres variétés végétales sont également considérées dans la voie cellulosique. Cependant, plusieurs d'entre elles, tel que le *P. viratum* et le *Miscanthus sp.*, présentent un risque important pour l'environnement (Paul et Ernsting, s.d.). Par exemple, Stewart (2007) note les dangers de pollution génétique des populations naturelles par hybridation spontanée chez des cultures génétiquement modifiées de peupliers, de *P. viratum* ou encore de *Miscanthus sp.* Pour contrer ce phénomène, Heaton *et al.* (2004) suggèrent l'introduction de gènes de stérilité, qui permettrait par exemple de contrôler des espèces envahissantes telles que le *Miscanthus sp.* Toutefois, la stérilisation de telles plantes signifie qu'elles sont non seulement transgéniques mais également brevetées, conduisant à une appropriation privée de certains types de cultures. En outre, ce type de technologie n'est pas complètement efficace et ne peut totalement prévenir une contamination future (GenewatchUK, 2008). Nous ne connaissons pas les conséquences sur l'environnement et sur la biodiversité en général du transfert de gène sur la diminution de la biosynthèse de la lignine au niveau des populations naturelles (Paul et Ernsting, s.d.). Il semble de plus difficile de penser pouvoir contrôler la dissémination de variétés d'arbres, modifiées pour la production d'éthanol, dont un des modes de reproduction se fait par drageonnement, telles que les peupliers. Le transfert

en milieu naturel d'un caractère structurel de faible teneur en lignine pourrait tout simplement avoir des effets dévastateurs et irréversibles sur les populations naturelles.

Une sylviculture énergétique aura aussi des répercussions sur le climat. Par exemple, on rapporte que des peupliers transgéniques (*Populus tremuloides*) diminuent grandement l'accumulation de carbone dans le sol en comparaison à des peupliers naturels : 30% moins de carbone dans l'arbre lui-même et 70% moins de carbone dans les sols (Hancock *et al.*, 2007). Notons également que des arbres à des teneurs plus faibles en lignine se décomposeront plus rapidement une fois au sol, transformant la structure du sol et le cycle du carbone (Paul et Ernsting, s.d.). En ce sens, il semble que ces arbres génétiquement modifiés présentent des aspects négatifs dans la lutte au réchauffement climatique, éliminant certains bénéfices annoncés du passage des carburants fossiles aux carburants végétaux.

Il est intéressant de remarquer qu'aucune étude ne semble s'attarder à la question des dangers potentiels de l'introduction dans l'environnement de microorganismes spécifiquement modifiés afin de faciliter les différentes étapes de la production d'éthanol à partir de la cellulose.

Compte tenu de l'intensité des besoins énergétiques et de l'accroissement de la production de carburants végétaux, ces cultures énergétiques génétiquement modifiées devront sans doute être faites sur de grandes surfaces pour être compétitives. Des variétés végétales à hauts rendements, OGM ou non, « *require more inputs and thus could pose environmental and genetic risks unless grown sustainably and with care to minimize risk to native species* » (Groom, Gray et Townsend, 2008). La culture de la biomasse ne peut à la fois permettre de maintenir la biodiversité et être économiquement profitable. En ce sens, il sera très certainement difficile de concilier cultures énergétiques soutenables et monocultures. Comme le souligne alors Hodge (2002),

« can we trust the ethanol industry to contain genetically modified or bioengineered bacteria needed to make ethanol from cellulose? Can we trust an industry that is emitting 5-430 times their permitted emissions levels to contain a new creation that has the potential to literally eat us out of house and home? Do the benefits justify the risk? » (p. 20).

4.3.4 La qualité de l'air et la santé humaine

À l'image de l'éthanol-maïs, les gains attribuables à l'éthanol cellulosique au niveau de la qualité de l'air ne peuvent être attribués à sa combustion. Comme nous l'avons indiqué précédemment, la

combustion de l'éthanol émet les mêmes composés au sortir du moteur, peu importe son origine : l'éthanol est le même composé chimique, qu'il soit produit à partir de l'amidon ou de la cellulose du maïs. À la section 3.2.4, nous avons rapporté que la combustion de l'éthanol entraîne l'augmentation des émissions de NO_x, de CO, de formaldéhyde, d'acétaldéhyde et d'O₃ dans l'atmosphère (Hodge, 2002; Jacobson, 2007; Niven, 2005). Ces composés, tout particulièrement responsables de la formation du smog photochimique en milieu urbain, augmentent les risques pour la santé humaine.

Bien peu d'études abordent la question des implications, sur la question de l'environnement, de la production d'éthanol à partir de la paille de maïs. Sommes toutes, certains mentionnent néanmoins que ses différentes étapes de production ont également des impacts sur la qualité de l'air. Sheehan *et al.* (2003) rapportent que le retrait des champs de la paille de maïs fait augmenter substantiellement les émissions en NO_x du sol et que la combustion des résidus de la lignine à l'usine de production accroît les émissions de SO_x. De plus, parce qu'une production pouvant répondre aux objectifs énoncés par le gouvernement des ÉU ne peut se faire que par la mise en culture de terres supplémentaires, on devra alors tenir compte des nouvelles émissions relatives au changement d'affectation de ces terres (pâturage, terres moins productives, forêt), au sol cultivé lui-même, à la mécanisation nécessaire à leur exploitation et aux bioraffineries comme telles (Searchinger *et al.*, 2008).

4.3.5 La sécurité énergétique et les coûts de production

Une incertaine sécurité énergétique

Plus que l'éthanol-maïs, l'option cellulosique vise à répondre à une partie des projets de la figure de sécurité énergétique aux ÉU, si bien que le gouvernement des ÉU a ainsi mis en place de nombreux programmes favorisant l'option cellulosique. Ces programmes mettent notamment l'accent sur l'augmentation de l'efficacité quant à la conversion de la cellulose en éthanol dans le but d'en faire un carburant concurrentiel à l'essence et à l'éthanol-maïs (Sanderson, 2006). De ceux-ci, il faut mentionner le *Renewable Fuels for Energy Security Act* de 2001, les *Fuels Security Act* et *Energy Policy Act* de 2005, et le dernier *U.S. Energy Bill*. L'*Energy Policy Act* offre notamment des incitatifs afin d'arriver d'ici 2013 à une production annuelle de 946 millions

de litres (Johnson *et al.*, 2007). Le *U.S. Energy Bill* cherche, quant à lui, faire passer la production d'éthanol à environ 80 milliards de litres d'ici 2022, principalement à partir des résidus agricoles et des cultures pérennes (USSenate, 2007). Cependant, compte tenu notamment de la faible densité énergétique de l'éthanol, c'est environ 454 milliards de litres d'éthanol qui seraient alors nécessaires afin de remplacer les 315 milliards de litres importés en 2004 (USDOE, 2006).

Certains auteurs présentent une vision pour le moins optimiste de la production future d'éthanol cellulosique, allant jusqu'à permettre aux ÉU de s'affranchir entièrement de leurs importations en provenance du Golfe Persique et des autres zones géopolitiques instables. Par exemple, Sanderson (2006) estime qu'il y aurait suffisamment de matériel végétal disponible aux ÉU pour produire environ 381 milliards de litres d'éthanol cellulosique par année. Greene et Mugica (2005) estiment qu'ils pourraient plutôt en produire l'équivalent de 1,26 milliard de litres de pétrole par jour - ou environ l'équivalent de 461 milliards de litres de pétrole par année - , s'ils investissaient agressivement dans le développement de la filière cellulosique : « *biofuels could virtually eliminate our demand for gasoline by 2050 [,] be cheaper than gasoline and diesel, saving us about \$20 billion per year on fuel costs by 2050 [and] provide farmers with profits of more than \$5 billion per year* » (p. 1). De La Torre Ugarte, English et Jensen (2007) soutiennent que l'ensemble de la production de carburants végétaux aux ÉU pourrait remplacer jusqu'à 1666,3 milliards de litres de pétrole d'ici 2030, une économie de 629 milliards de \$US. À eux seuls, l'éthanol-maïs et l'éthanol-maïs cellulosique contribueraient à plus du tiers de la production. La paille de maïs représente pour certains la première étape d'un approvisionnement en carburants végétaux qui en viendrait à être basé sur d'autres variétés végétales, comme par exemple le panic érigé (McLaughlin *et al.*, 2002; Sanderson, 2006). Quoi qu'il en soit, et malgré sa nette progression, la production d'éthanol cellulosique aux ÉU reste marginale. Selon les données compilées de la RFA, c'est environ 50 millions de litres qui ont été produits aux ÉU à partir de divers résidus agricoles (RFA, 2009a). Au Canada, la capacité de production d'éthanol cellulosique est de 2 millions de litres, produits essentiellement à la raffinerie Iogen et à partir de résidus de la culture du blé (ACCR, 2009). En outre, cet éthanol cellulosique au bilan énergétique incertain (sect. 4.2.2) permettrait, au mieux, une mince économie d'énergie ou, au pire, perpétuerait la dépendance à d'autres formes énergétiques comme les énergies fossiles.

Il est irréaliste de croire que l'option cellulosique pourrait permettre d'atteindre l'indépendance et la sécurité énergétiques escomptées aux ÉU. Les calculs prennent généralement en compte les

estimations de volumes de cellulose potentiellement disponibles et d'éthanol potentiellement produit par rapport à la consommation de pétrole. Toutefois, comment savoir si ces volumes potentiellement accessibles, l'approvisionnement alimentaire domestique, la pérennité de la fertilité des sols, l'augmentation des conséquences de l'intensification des cultures sur les changements climatiques locaux et leurs effets sur l'agriculture n'interféreront pas les uns avec les autres et n'auront pas un effet d'amplification synergique? La production non soutenable de l'ensemble de la paille de maïs, la plus importante source de biomasse végétale actuellement disponible aux États-Unis, correspondrait à 38,4 milliards de litres d'éthanol annuellement (Kim et Dale, 2004) – ou étant donné sa densité énergétique plus faible, à environ 8,5% de la consommation nationale d'essence. Ajoutée à la production actuelle d'éthanol-maïs, qui dérive du quart de la récolte annuelle de maïs-grain aux États-Unis (Canada, 2008e ; USDA-NASS, 2008), c'est un peu plus de 10% de la consommation d'essence qui pourrait être remplacé. Quelle quantité faudrait-il faire fermenter pour parvenir aux 30% visés par le gouvernement (Bush, 2007b; US Senate, 2007)? Compte tenu que le mince pourcentage d'éthanol issu du maïs a suffi à accroître la crise alimentaire mondiale, prétendre viser la sécurité énergétique nationale par des cultures, elles-mêmes dépendantes de maladies, de ravageurs, du climat, de l'eau, de la fertilité des sols, des rendements agricoles, etc., n'est-elle pas une entreprise passablement risquée, non seulement pour le pays visé mais également pour la sécurité alimentaire du monde.

Les coûts de production

Nous savons que la voie cellulosique n'est pas encore prête pour une production industrielle. Ses coûts de production sont trop élevés pour que l'on puisse espérer sa commercialisation. Pour être concurrentielle avec les carburants fossiles et avec l'éthanol de 1^{ère} génération, ses coûts de production devraient probablement être assumés par des subventions et par divers crédits à la consommation, tout comme l'est actuellement l'éthanol-maïs (voir section 3.2.6).

C'est à la conversion de la cellulose en éthanol que les coûts sont les plus élevés, au point de freiner sa commercialisation. « *Current methods to break down biomass into simple sugars and convert them into ethanol are inefficient and constitute the core barrier to producing ethanol at quantities and costs competitive with gasoline* » (USDOE, 2006, p. 3). Les coûts des nouvelles technologies pourraient être réduits à travers la recherche, le développement et leur valorisation sociale (Chum et Overend, 2001). Actuellement, les coûts de conversion de la cellulose sont plus

élevés que ceux de l'amidon. « *However, results from ongoing research suggests that conversion costs can be reduced significantly* » (Perlack et Turhollow, 2003). Les coûts élevés relatifs au changement de structure génétique font en sorte que les recherches actuelles se concentrent davantage sur certaines plantes et résidus agricoles à bas coûts ainsi que sur des variétés végétales connues pour leur contenu élevé en cellulose (Ragauskas *et al.*, 2006). Certains considèrent que les volumes de paille de maïs suffiraient à supporter une production commerciale d'éthanol cellulosique (di Pardo, 2000; Hettenhaus, Wooley et Wiselogle, 2000; Johnson *et al.*, 2007).

Les coûts de production sont aussi dépendants de la ressource, du volume d'approvisionnement et de la qualité de la biomasse comme telle. « *Cellulosic ethanol is particularly promising because it can capitalize on the power of biotechnology to dramatically reduce costs* », nous dit Wyman (2001). C'est dans cette optique que le USDOE (2006), à travers la recherche entourant le développement de technologies de conversion de la biomasse en éthanol, tente d'abaisser le coût de production à environ 0,28\$ US le litre afin de faire de l'éthanol cellulosique un carburant concurrentiel par rapport aux autres. Sheehan *et al.* (2003) estiment qu'il coûterait actuellement plus de 0,33\$ US pour produire un litre d'éthanol à partir de la paille. Perlack et Turhollow (2003) ont estimé le coût de production (récolte, manutention, transport) de la paille de maïs entre 43,10 à 51,60\$ US la tonne de paille sèche. Ces coûts varient est fonction du volume d'approvisionnement, de la taille de l'usine de transformation, de son éloignement des champs où elle s'approvisionne et des frais liés à ce transport. À eux seuls, les coûts de transport, de récolte et le paiement à l'agriculteur comptent pour 90% des frais d'approvisionnement. Selon Perlack et Turhollow, les coûts liés aux transports baissent lorsque la disponibilité de la ressource est plus grande. L'étude de Kadam et McMillan (2003) rapporte que les coûts de production de la paille de maïs, du champ à la raffinerie, sont plutôt de 72\$ US la tonne. Burt (2006) rapporte toutefois que l'industrie recherche des prix allant de 3,19 à 16,50\$ US la tonne pour s'approvisionner en résidus agricoles, variant selon la distance du transport. Ces montants suffiraient à peine pour couvrir les dépenses de l'agriculteur reliées à la récolte, à la manutention et aux intrants azotés additionnels (Burt, 2006). Selon les estimations de Sokhansanj *et al.* (2002), il serait possible de produire 280 litres d'éthanol par tonne de paille de maïs à l'aide des techniques actuelles qui permettent de faire fermenter les sucres de la cellulose et de l'hémicellulose. Les coûts liés à la récolte, à la manutention et aux transports seraient ainsi, à eux seuls, d'environ 0,15 à 0,26\$ US le litre d'éthanol produit. Si on en croit alors ces experts, qui prétendent que les coûts de conversion

sont les plus importants, et bien que la littérature ne soit guère explicite quant à ce sujet, il risque d'en coûter beaucoup plus cher que les 0,33\$ le litre suggéré par Sheehan *et al.* (2003).

4.3.6 La sécurité alimentaire et l'option cellulosique

Compte tenu de la participation des carburants végétaux de 1^{ère} génération au niveau de la crise alimentaire actuelle, de nombreux auteurs souhaitent une transition rapide vers la production de carburants végétaux de 2^{ème} génération. Par exemple, Jean Ziegler, Rapporteur spécial pour le droit à l'alimentation de l'ONU, qui qualifie les carburants de 1^{ère} génération de « crime contre l'humanité », a appelé à un moratoire de cinq ans sur leur production ; le temps, précise-t-il, « que la recherche trouve le moyen de tirer de l'éthanol des déchets agricoles, essentiellement des parties non comestibles de plantes comme le maïs » (ONU, 2007b). Certains rapportent que les conflits d'usage pour l'utilisation des terres (alimentation contre énergie) et les problèmes d'approvisionnement alimentaire subséquents pourront être évités par la voie cellulosique (FAO, 2008; Hill, 2007; Hoskinson *et al.*, 2007; Kim et Dale, 2004; NAS, 2003; Sanderson, 2006; Solomon, Barnes et Halvorsen, 2007; UNESCO, 2008). Dans leur dernier rapport respectif sur la crise alimentaire mondiale, la FAO et l'UNESCO font état des avantages des carburants de 2^{ème} génération (FAO, 2008; UNESCO, 2008). Il s'agit de trouver une alternative à la fois au pétrole et aux carburants de 1^{ère} génération, les deux participant à l'escalade du prix des denrées et à la crise alimentaire qui sévit actuellement.

Plusieurs présentent les carburants de 2^{ème} génération comme alternative aux carburants végétaux de 1^{ère} parce qu'ils sont issus de sources non-alimentaires. Produits à partir de parties non-comestibles de plantes, ils n'entreraient pas en concurrence directe avec les cultures alimentaires. Sanderson (2006) souligne que les partisans de la voie cellulosique « *have to find a way for people to see biomass as a renewable energy crop that won't compete with food or affect commodity prices* » (p. 674). Sokhansanj *et al.* (2002) précisent qu'une source alternative comme la paille de maïs pourrait aider à satisfaire l'augmentation de la demande en éthanol sans pour autant avoir des impacts sur l'augmentation du prix des denrées. Dans leur étude, Hoskinson *et al.* (2007) rapportent que la conversion de la paille de maïs en éthanol pourrait être complémentaire avec la culture du maïs-grain. Ainsi, si on laissait suffisamment de résidus au champ pour empêcher les impacts de l'érosion et de la perte de fertilité des sols, précisent-ils, il serait possible

de récolter à la fois le maïs-grain à des fins alimentaires et la paille à des fins énergétiques. En ce sens, la transformation des résidus du maïs n'interfère pas avec la culture de denrées. C'est ce que suggèrent également Kim et Dale (2004) : « *to avoid conflicts between human food use and industrial use of crops* », seuls les résidus de culture devraient être considérés pour la production de carburant (p. 361). En ce sens, Hill *et al.* (2006) soutiennent que l'éthanol cellulosique, pouvant être tiré de cultures pérennes « *that can be produced on agriculturally marginal lands with minimal fertilizer, pesticide, and fossil energy inputs, or produced with agricultural residues* » (p. 11209), sera plus bénéfique que le pétrole ou encore les carburants de 1^{ère} génération. Cole *et al.* (1997) suggèrent qu'il serait aussi possible de produire des cultures énergétiques « *[by] intermixing biofuel plants with food or forage plants in an agroforestry system* » (p. 223).

Néanmoins, une transition vers les carburants végétaux de 2^{ème} génération peut-elle se faire, à l'instar des carburants végétaux de 1^{ère} génération, au détriment de la sécurité alimentaire? Les résidus agricoles servent déjà à la fertilisation des sols et à l'alimentation animale (Lal, 2005) : le retrait du couvert végétal appauvrit le sol en empêchant le recyclage des nutriments et en favorisant l'érosion. En ce sens, comme le souligne Burt (2006), peut-on considérer la paille de maïs comme un déchet agricole à valoriser? Il est également possible de concevoir que des exploitations de cultures énergétiques pérennes et de sylvicultures énergétiques puissent déborder hors des terres considérées comme marginales et dégradées. L'usage de variétés végétales envahissantes, comme le sont *P. virgatum* et *Miscanthus sp.*, pourrait aussi avoir des conséquences sur les autres cultures. Sans règlements précis sur la question, l'intérêt spéculatif pour une alternative à l'essence risque de préférer des terres agricoles fertiles, permettant de meilleurs rendements, à des terres laissées actuellement à l'abandon ou à leur état naturel, parce qu'elles ne sont pas considérées comme étant assez productives. Encore une fois, il est permis de croire que l'intensité de la demande énergétique mettra une pression accrue sur les cultures alimentaires.

La littérature fait essentiellement référence au caractère non-alimentaire de l'option cellulosique afin de justifier son potentiel en tant qu'alternative aux carburants de 1^{ère} génération. Bien que cette option puisse présenter des avantages non négligeables par rapport au pétrole et aux carburants de 1^{ère} génération, on ne peut négliger les conséquences éventuelles de son intégration aux logiques de marchés qui mènent actuellement aux conflits d'usage des terres et aux prix

élevés des denrées. En outre, plus sa rentabilité augmentera et sera profitable, plus la culture de cette génération de carburant risque de détourner de la production agricole actuelle encore davantage d'eau et de terres. Compte tenu du potentiel économique que fait miroiter un possible successeur au pétrole, il serait permis de croire que certaines régions du monde envisageront certainement la possibilité de choisir entre des cultures alimentaires et des cultures énergétiques.

4.4 UN TROISIÈME CONSTAT : L'ALIBI D'UNE PROMESSE TECHNOLOGIQUE

Cette section nous a permis d'explorer les impacts sur l'environnement et sur la société qu'aurait la mise en œuvre à grande échelle de l'option cellulosique, qu'il nous semble difficile de qualifier de choix viable. Si cette production peut répondre à certaines des problématiques engendrées par les carburants végétaux de 1^{ère} génération, elle risque toutefois d'en entraîner d'autres, repoussant à plus tard certains enjeux déjà soulevés par la production d'éthanol-maïs, comme les conflits d'usages entre cultures alimentaires et cultures énergétiques ou encore les émissions polluantes de la combustion de l'éthanol comme tel.

Cependant, comme les experts s'accordent plutôt sur les bénéfices que peuvent engendrer l'utilisation des résidus agricoles pour la fabrication de carburant et qu'aucune étude n'a encore été réalisée sur les conséquences d'une production d'éthanol cellulosique à grande échelle à l'égard de la production alimentaire, des écosystèmes, des émissions globales de GES, de la pérennité de la fertilité des sols ou encore des réserves d'eau, il est encore difficile de dégager des conclusions fermes.

L'utilisation de la paille, entre autres voie cellulosique, n'est toutefois pas exempte de critiques. Bien qu'aucune étude n'ait réellement tracé un portrait exhaustif sur l'ensemble des risques liés à son usage, l'accumulation d'indices et d'anticipations soulève quand même certaines préoccupations et quelques questions. Les auteurs sont particulièrement nombreux à s'inquiéter des impacts du retrait du couvert végétal et de la mise à nu des sols agricoles. Ceux-ci favorisent l'érosion des sols et la diminution de leur fertilité. Cela risque d'ailleurs d'influencer négativement les rendements agricoles, tant pour les cultures énergétiques que pour les cultures alimentaires. À long terme, cela nécessitera l'ajout d'intrants agricoles additionnels dans le but de compenser les effets de baisse de fertilité des sols. Cette dépendance de l'agriculture envers le

secteur industriel de l'agrochimie, lui-même énergivore, diminuera d'autant plus la valeur énergétique du carburant.

Les sols pourront-ils alors suffire à la demande? Une diminution des rendements agricoles, ainsi qu'une expansion des terres destinées à des cultures énergétiques pérennes, risquent de perpétuer les effets de la production d'éthanol sur l'instabilité alimentaire. En effet, si la crise alimentaire actuelle est un problème économique structurel, notamment par le déploiement de la demande asiatique en énergie et en viande, les prix continueront d'augmenter. Les surfaces terriennes exploitées pour répondre à l'augmentation de la demande énergétique augmenteront, ce qui mettra très certainement une pression encore plus forte sur la biodiversité. De plus, les terres arables disponibles à l'agriculture ne sont pas illimitées. Nous envisageons aujourd'hui l'épuisement des réserves de pétrole dans le sous-sol de la planète; devrions-nous aussi envisager la possibilité d'épuiser, avant même leur réel déploiement, ces « réserves d'éthanol » en épuisant les sols? Et accentuer davantage encore le déclin actuel de la biodiversité?

Pour ces multiples raisons, il est impossible d'affirmer que l'option de l'éthanol-maïs cellulosique est viable. Basé sur les promesses de certains développements technoscientifiques, son potentiel repose sur la double hypothèse d'une conversion facilitée de la biomasse végétale en éthanol et d'une baisse des coûts de production grâce à l'augmentation de l'efficacité des processus. Toutes les estimations de la production d'éthanol cellulosique dépendent de la capacité à transformer la cellulose en éthanol, procédés actuellement fort complexes et coûteux, que l'optimisme technoscientifique permettrait de résoudre.

D'autres par contre privilégient comme alternative de miser sur la capacité de changer les habitudes de vie et les modes de production, responsable de notre gourmandise en énergie fossile. Wyman (2007) exprime clairement ce point de vue : « *Cellulosic ethanol is particularly promising because it can capitalize on the power of biotechnology [...]. Although we can hope for a miracle cure for our addiction, we cannot count on one* » (p. 153). Dans la littérature consacré au sujet, on avance que le potentiel de production d'éthanol cellulosique est énorme, prometteur, voire salvateur, bien que la plupart s'empresse d'ajouter que la technologie n'est pas tout à fait au point et que les coûts de production sont encore trop élevés pour penser commercialiser le produit dès maintenant. En invoquant les promesses de développement technologique qui semble

évidentes, ces textes évoquent les limites de l'éthanol cellulosique, qui ne semblent alors que passagères pour qu'on y investisse les fonds requis.

Alors que les limites de l'éthanol de 1^{ère} génération sont de plus en plus clairement établies, celles de la voie cellulosique sont encore très peu soulevées. Il est possible de spéculer, notamment que davantage de recherches scientifiques et techniques nous permettront de parvenir aux développements technologiques annoncés. Pour l'instant, néanmoins, la valeur énergétique de l'éthanol cellulosique est très certainement trop faible, voire même négative, afin de justifier sa production à grande échelle, compte tenu de l'ensemble de ses conséquences qui devraient être compensées.

Il est également mis de l'avant que l'option cellulosique possède des vertus environnementales non négligeables. On pourrait très certainement avancer que la perception de la population sur la valeur des carburants végétaux influence leur commercialisation. L'image verte, propre et renouvelable des carburants végétaux de 2^{ème} génération, en plus d'être présenté comme socialement acceptable (d'un point de vue de l'insécurité alimentaire), permet de faire accepter une technologie du vivant auparavant objet de controverses sociotechniques. C'est ce que Uihlein, Ehrenberger et Schebek (2007) énoncent lorsqu'ils suggèrent les deux critères qui permettront à l'option cellulosique de s'épanouir : soit (i) l'image auprès des consommateurs et (ii) les coûts de production du produit. Une fois ses coûts de production suffisamment réduits, le produit pourra connaître son succès sur le marché. Les OGM, généralement rejetés dans le secteur agroalimentaire, sont promus au rang d'option verte dans le secteur agroénergétique. En ce sens, Koonin (2006) et Ragauskas *et al.* (2006) comparent l'épanouissement de l'option cellulosique comme une révolution encore plus importante que celle de la Révolution verte. Certes, il est certain que cette révolution agricole a permis d'augmenter les rendements et de nourrir davantage d'êtres humains. Il n'en demeure pas moins cependant que l'augmentation de la production alimentaire mondiale n'a pas résolu les problèmes de la faim dans le monde. De plus, cette Révolution verte correspond au passage d'une industrie chimique essentiellement basée sur les résines (issu du monde végétal), au début du 20^{ème} siècle, vers une industrie pétrochimique basée sur le pétrole, au milieu du siècle. La naissance des préoccupations environnementales – de même que la naissance de la notion « environnement » - correspond également à cette même époque. En ce sens, le déploiement de cette filière énergétique semble bien plus reposer sur l'alibi d'un développement technologique annoncé que l'objectif de la lutte aux changements climatiques

anticipés par exemple. On pourrait très certainement ajouter qu'elle repose en forte partie sur un potentiel de développement économique.

Au nom de la lutte aux changements climatiques anticipés, pouvons-nous mettre en œuvre toutes les options qui sont à notre portée, comme c'est le cas avec les OGM, où industriels et agriculteurs voient les carburants végétaux comme un nouveau débouché? Une fois l'augmentation de l'efficacité des processus de conversion et la diminution des coûts de production atteintes, à quels nouveaux défis ferons-nous face? Que fera-t-on des nouvelles variétés microbiennes et végétales fabriquées? Aurons-nous assisté à l'introduction massive d'OGM dans la nature? Que provoquera, sur les variétés végétales actuelles, l'introduction de variétés végétales possédant moins de lignine et des microorganismes construits pour vaincre la résistance naturelle des plantes à la décomposition biologique (Wyman, 2001)? Dans le but d'éviter le conflit d'usage de la terre entre cultures alimentaires et cultures énergétiques, en constituerons-nous un autre entre les écosystèmes naturels et les terres exploitées?

L'enjeu alimentaire actuel, qui accélère la transition aux carburants végétaux de 2^{ème} génération, masque une partie du discours qui se construisait auparavant autour de la question des carburants de 1^{ère} génération : *devons-nous produire de l'éthanol?* L'urgence de trouver une alternative, premièrement au pétrole et deuxièmement à l'éthanol dérivé des cultures alimentaires, a pour effet de nous mener plutôt à la question *à partir de quoi devons-nous produire l'éthanol*. Les carburants végétaux, considérés comme une forme d'énergie renouvelable, peuvent théoriquement nous fournir une grande quantité d'énergie. Une fois les développements technologiques nécessaires réalisés, peut-être que l'option cellulosique pourra répondre à la demande énergétique et saura prendre une partie de la place du pétrole. Toutefois, pourra-t-elle éviter le problème d'usage des terres sans compromettre l'intégrité et la pérennité des écosystèmes naturels et de la biodiversité en général, par l'expansion des terres exploitées et par les pollutions chimique et génétique? La production de carburant par les plantes n'est pas une idée mauvaise en soi ; c'est la production intensive de carburant à partir des plantes pour répondre à une demande massive en énergie qui vient plutôt à poser problème.

En ce sens, si une amélioration de l'efficacité énergétique, un changement de nos modes de vie et une source énergétique autre que le pétrole permettent à l'humanité d'atteindre les 8 à 12 milliards d'humains, la biomasse végétale dans son ensemble risque d'être essentielle à d'autres

usages. La biomasse des écosystèmes naturels sera nécessaire afin de fournir le support essentiel à l'espèce humaine en stabilisant la structure et les fonctions de la biosphère (Giampietro, Ulgiati et Pimentel, 1997). La diversité et la santé des communautés naturelles deviennent quelque sorte le capital le plus important de l'humanité ; aucune technologie ni aucun procédé ne seront alors en mesure de compenser leur perte. La diminution de la consommation, l'amélioration de l'efficacité des procédés déjà à l'œuvre, la consommation locale, la production de carburants végétaux locaux, etc. sont très certainement des solutions davantage accessibles, faisables et généralement ignorées. En ce sens, la question environnementale semble devoir passer avant tout par une réflexion sur les valeurs centrales de nos sociétés, qui tendent généralement à faire correspondre consommation matérielle et croissance économique à l'idée de bien-être sociétale et de bonheur individuel.

CONCLUSION

Synthèse de l'étude

Ce mémoire avait pour objectif d'évaluer les impacts environnementaux et les effets sociaux de la production d'éthanol-maïs et d'éthanol-maïs cellulosique en Amérique du Nord. Notre étude s'appuie sur une exhaustive revue de la littérature scientifique portant sur ces carburants végétaux. En mettant en débat, tour à tour, les éléments de discours des partisans et des détracteurs sur les options de 1^{ère} et de 2^{ème} génération, nous avons pu mieux saisir les promesses, les apports, mais également les zones d'ombres de ces divers discours. Étant donné l'influence de la littérature scientifique sur les choix sociopolitiques, ces travaux sur les carburants végétaux méritent d'être pris en compte. La littérature scientifique, relayée par les discours médiatiques, contribue à la construction des représentations des carburants végétaux de l'ensemble de la population. Or, cette littérature scientifique n'échappe pas à certaines prémisses idéologiques conduisant, par exemple, à intégrer ou non certaines variables à leur calcul ou à considérer seulement certains facteurs à leur analyse de cycle de vie (Hodge, 2003; Niven, 2005). Cette mise en dialogue des différents arguments scientifiques entourant les cas de l'éthanol-maïs et de l'éthanol-maïs cellulosique, nous a permis de brosser un portrait relativement exhaustif des conséquences socio-environnementales de l'éthanol-maïs et de constater les limites des bénéfices annoncés. Les changements rapides de la situation mondiale des carburants végétaux dévoilent une croissance constante de la production des carburants végétaux de 1^{ère} génération et un appel de plus en plus manifeste à la transition vers la 2^{ème} génération. En ce sens, les constats tirés de la mise en œuvre problématique des carburants de 1^{ère} génération, à travers le cas du maïs, ont pu servir de cadre de lecture afin d'évaluer les risques de la mise en œuvre de l'option cellulosique.

Nous nous sommes d'abord penché sur la problématique actuelle des carburants végétaux, principalement en Amérique du Nord : l'état de la situation énergétique, la fin appréhendée du

pétrole, le choix des carburants végétaux, le cas spécifique de la production d'éthanol à partir du maïs (aux ÉU et au Canada), la représentation générale d'un carburant vert, le rôle des experts scientifiques dans la construction de cette représentation. Un constat général s'en dégage : depuis deux décennies, la production de carburants végétaux connaît un engouement mondial certain et le maïs aux ÉU – ainsi que la canne à sucre au Brésil – figurant parmi les plus importantes sources de cette filière. Mondialement, l'ensemble des carburants végétaux destinés aux transports provient de cultures alimentaires.

Notre consommation annuelle de carburants fossiles était d'environ 1170 milliards de litres au début des années 2000, une production tirée du pétrole dont on appréhende aujourd'hui la fin (Kim et Dale, 2004). Pour nos sociétés énergivores, dont la majeure partie du secteur des transports repose sur le pétrole, l'importance de pouvoir compter sur des énergies alternatives devient sans aucun doute un enjeu prioritaire, alors que, paradoxalement, les interventions visant à réduire la consommation d'énergies fossiles découragent d'autres développements techniques, d'autres véhicules et d'autres modalités de transport. En Amérique du Nord, et tout particulièrement aux ÉU, on a basé cette approche sur le développement de la filière de l'éthanol-maïs. Par exemple, les gouvernements des ÉU et du Canada ont mis en place différentes mesures afin de favoriser le déploiement de cette filière. Aujourd'hui, les ÉU sont les plus grands producteurs, avec une production d'environ 34 milliards de litres (près de la moitié de la production mondiale). Le Canada n'en produit que 900 millions de litres (soit environ 1,5% de la production mondiale). Toutefois, malgré l'importance du virage, cette production ne correspond aux ÉU qu'à un peu plus de 1% de la consommation nationale de carburant. Dernièrement encore, on voulait faire passer à 57 milliards de litres la production d'éthanol-maïs d'ici 2022 aux États-Unis (USSenate, 2007). Or, le plus gros producteur mondial de maïs (environ 40%) détourne ainsi 20% de sa récolte nationale et 8% de la récolte mondiale de la récolte alimentaire à de telles fins énergétiques, ce qui réduit l'approvisionnement alimentaire mondial. Comme le soulignait Jean Ziegler (ONU, 2007b), alors Rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation à l'ONU, la production d'éthanol de 1^{ère} génération, issu des cultures alimentaires – comme c'est le cas de l'éthanol-maïs –, doit ainsi être considérée comme un « crime contre l'humanité ». Qui plus est, cette énergie, que l'on dit propre, verte et renouvelable, tire sa source de la culture non seulement la plus exigeante, en termes d'eau, d'engrais et de pesticides, sans parler des impacts environnementaux de telles monocultures intensives. Conséquemment, cette production porte en

elle des conséquences sur l'environnement qui font nettement oublier son caractère d'outil de lutte au réchauffement climatique mis de l'avant par plusieurs.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la mésentente entre les partisans et les détracteurs de l'option éthanol-maïs, ce qui a permis à travers l'analyse de leur argumentaire de constater que l'option présente plus de désavantages que de bénéfices. La culture du maïs est en elle-même une culture énergivore, notamment en intrants, en mécanisation, en énergie et en eau. De nombreuses études montrent que sa culture entraîne une forte érosion, ayant des impacts sur la pérennité de la fertilité des terres arables et sur les écosystèmes aquatiques. Comme de nombreux auteurs le soulignent, le détournement d'une part de plus en plus importante des cultures originellement destinées au secteur de l'alimentation vers le secteur de l'énergie, participe à l'explosion des coûts des denrées. Il faut aussi ajouter que la montée du prix du pétrole – que les carburants végétaux sont appelés à remplacer partiellement – joue aussi un rôle très important dans cette montée des prix. Ce nouveau débouché agricole, couplé à la montée des prix de l'énergie, pousse davantage d'agriculteurs à se tourner vers ce type d'exploitation. Loin de régler la situation, les projets de loi canadienne (C-33) et états-unienne (*2007 US Energy Bill*) accentuent davantage encore le phénomène.

L'éthanol, présenté comme agent de lutte aux changements climatiques, est aussi fortement mis en doute : la combustion même de l'éthanol est polluante. Mis bout à bout et considéré dans l'ensemble de ses étapes de production, l'éthanol-maïs émet finalement plus de GES qu'il ne permet d'en séquestrer et demande plus d'énergie qu'il n'en fournit. En outre, contribuant de façon significative à l'épuisement des sols, il n'a de renouvelable que le renouvellement des cultures de maïs, mais pour combien de temps encore?. En ce sens, la production de l'éthanol à partir du maïs ne présente pas une alternative viable, même partielle, dans le contexte d'épuisement progressif du pétrole, de recherche d'une sécurité énergétique accrue et de la lutte aux changements climatiques. Non seulement, elle ne remplit aucunement ses promesses mais elle contribue à accroître l'insécurité alimentaire mondiale et la dégradation de la biodiversité.

Face à la controverse grandissante entourant les carburants végétaux de 1^{ère} génération, on assiste à l'émergence de la filière de l'éthanol cellulosique. Les objectifs du gouvernement des ÉU sont d'atteindre une production de 79 milliards de litres en 2022 d'éthanol cellulosique (USSenate, 2007), ce qui ne correspondrait toutefois qu'à environ 4% de la consommation d'essence aux ÉU.

En examinant la littérature sur le sujet, nous avons montré que cette filière présente également de nombreuses limites, qui devraient être analysées en profondeur avant de s'élancer dans une quelconque production commerciale.

Une production d'éthanol, fabriqué à partir de la cellulose, doit être issue d'une biomasse végétale relativement homogène, compte tenu de l'importante variation en composés structuraux d'une variété végétale à l'autre (lignine, cellulose, hémicellulose) et des limites des procédés de conversion. En ce sens, les résidus agricoles issus de la plus importante culture agricole aux ÉU, la paille de maïs, constituent la seule source de biomasse végétale actuellement disponible en assez grande quantité pour pouvoir supporter une production à l'échelle commerciale. Bien qu'on présente cette option comme réponse ponctuelle à une part importante de la demande énergétique mondiale, l'option cellulosique n'est toujours pas disponible. Sa production à l'échelle commerciale dépend d'avancés du génie génétique qui permettraient de réduire ses coûts de production. Pour ce faire, les scientifiques cherchent à faciliter la conversion de la cellulose en éthanol, en travaillant à la création d'organismes végétaux génétiquement modifiés plus facilement dégradables par des microorganismes, eux-mêmes également modifiés et construits à cette fin. Tandis que la 1^{ère} génération fait de plus en plus l'objet de fortes controverses socio-environnementales, on promet à la deuxième un bien meilleur avenir. Pourtant, rien n'est moins sûr.

Nous avons ainsi pu constater qu'il était difficile de se représenter l'alternative cellulosique comme une option viable. Il est certain qu'elle représente, en théorie du moins, une source remarquable de sucres disponibles à la fermentation. Toutefois, les technologies ne sont toujours pas au point : les prévisions les plus optimistes avancent qu'elles pourraient être prêtes d'ici cinq ou dix ans. Nous avons notamment montré que plusieurs éléments posaient problème. Premièrement, l'importante demande énergétique mettra une forte pression sur le mode d'exploitation de cette filière. Par exemple, dans le cas des résidus agricole, la récupération de l'ensemble de la totalité des résidus du maïs (une culture qui, rappelons-le, représente la plus importante production agricole aux ÉU) permettrait de fournir 8,5% de la consommation actuelle de carburant destinée aux transports (Kim et Dale, 2004). Toutefois, la récolte de l'ensemble des résidus agricoles réduirait de façon marquée la productivité des sols et les rendements agricoles subséquents. Alors que le cas du maïs montre que la demande énergétique incite de nombreux agriculteurs à destiner leur production vers la filière énergétique, la possibilité d'une source de

revenus additionnels risque de les pousser à maximiser la récolte des résidus. Cela amplifierait l'érosion éolienne et hydrique conduisant à la perte des sols et réduirait la productivité des sols agricoles. La croissance de la demande énergétique ainsi que le déclin des réserves de pétrole augmenteront encore davantage la pression exercée sur la biodiversité, notamment par l'expansion des superficies destinées à l'agriculture. De plus, on peut craindre que ce phénomène n'ait des répercussions sur la sécurité alimentaire.

Avec une demande énergétique accrue et au nom de la sécurité énergétique, on assiste au développement rapide et à la mise en marché de technologies facilitant la conversion de la cellulose en éthanol, technologies basées presque exclusivement sur le génie génétique et le développement de variétés végétales transgéniques à plus haut ratio cellulose/lignine, pouvant être dégradées par des microorganismes également « construits » pour l'occasion. Le développement et la diffusion rapide de ces technologies risque fort d'accentuer les risques de contamination génétique de l'inventaire des autres variétés végétales (tant naturelles que cultivées), de leur passage à notre assiette ou encore, en diminuant présence de lignine, de l'introduction d'une faiblesse structurelle dans le monde végétal.

Cette étude, en comparant des carburants végétaux de 1^{ère} et de 2^{ème} génération à travers l'analyse globale de l'ensemble des processus de production des carburants végétaux, met clairement en évidence le caractère non viable de ces filières énergétiques et plus largement de nos modes actuels de production et de consommation, conduisant à privilégier l'agriculture pour satisfaire ces besoins en énergies fossiles. Avec la croissance de la demande énergétique, la fin appréhendée du pétrole, l'augmentation de la production d'une énergie alternative issue de la biomasse végétale, l'intensification des cultures et l'expansion agricole, force est de constater qu'en ne modifiant pas nos modes d'exploitation agricole, nous risquons d'assister à la dégradation des sols et à la diminution des rendements agricoles. En ce sens, la réutilisation des résidus agricoles à des fins énergétiques risque d'appauvrir encore davantage les sols. En mettant en évidence les impacts de l'augmentation des superficies destinées à la production de carburants végétaux issus de cultures alimentaires comme le maïs, cette étude attire également l'attention sur les risques semblables encourus par la mise en œuvre de l'option cellulosique. Cette étude met en évidence les risques pour la biodiversité et la santé humaine de l'intensification des cultures, de l'expansion des superficies destinées aux cultures énergétiques et de l'utilisation amplifiée de ces formes de transgènes, notamment végétale. Notre analyse invite à la plus grande prudence quant au

développement de recommandations sur le développement de cette filière, tout particulièrement dans le contexte québécois du développement de la filière cellulosique à partir de la biomasse forestière.

Les limites de l'étude

Étant donné la complexité de la problématique des carburants végétaux, il nous a été impossible d'aborder la question sous tous ses angles. La pluralité des types de carburants végétaux nous a obligés à nous centrer sur une seule source : nous nous sommes essentiellement attardés au cas du maïs développé aux ÉU et au Canada. Comme nous l'avons mentionné en avant-propos de ce mémoire, le paysage des carburants végétaux s'est rapidement transformé et développé autour de l'enjeu de la sécurité alimentaire au tournant de l'année 2008, nous obligeant alors à reconsidérer la voie de l'éthanol-maïs dans ce nouveau contexte, à la lumière d'une masse importante d'informations soudainement disponible et impossible à traiter entièrement. C'est également ce qui nous a amené à développer davantage la question des carburants végétaux de 2^{ième} génération. Deux problèmes se sont alors posés : (i) la multiplicité des types de carburants de 2^{ième} génération et (ii) le peu d'informations scientifiques entourant cette option. Bien que de nombreuses études, rapports et articles scientifiques fassent du développement des carburants végétaux de 2^{ième} génération, comme dans le cas des résidus agricoles, un incontournable du salut énergétique de nos sociétés, peu d'études en font leur objet d'étude en tant que tel. Cependant, lorsque c'est le cas, aucune n'en propose une analyse d'ensemble. Le cas de la paille de maïs était néanmoins celui qui offrait la plus importante littérature. Qui plus est, la production d'éthanol-maïs cellulosique est aussi celle qui est le plus près d'être mise en œuvre. Compte tenu des choix stratégiques faits par le gouvernement du Québec, le choix de la biomasse forestière aurait peut-être davantage collé à la réalité québécoise; toutefois, trop peu d'études étaient alors disponibles, bien que la question de la régénération des sols constitue également, comme dans le cas de la paille de maïs, un élément clé de l'analyse (Allmaras, Linden et Clapp, 2004; Blanco-Canqui et Lal, 2007; Blanco-Canqui *et al.*, 2006; Follett, 2001; Kaspar, Erbach et Cruse, 1990; Kim et Dale, 2004; Lal, 2005; Mann, Tolbert et Cushman, 2002; Pimentel et Lal, 2007; Power *et al.*, 1998; Varvel *et al.*, 2008; Wilhelm *et al.*, 2004).

L'étude plus approfondie des divers points de vue des scientifiques avec leur institution d'appartenance, leurs liens ou non avec l'industrie, aurait permis de mieux saisir le rôle clé des financements et des allégeances dans les prémisses mêmes des analyses. Nous avons aussi dû mettre de côté, en bonne partie, – comment ignorer, en effet – l'importance du discours économique en faveur du déploiement de cette filière fortement propulsée par les géants de l'industrie. Comme le souligne Herrera (2006), « *every major chemical, automotive and oil company in the world now has an industrial biotech division focused on biofuels or are developing finished products that will, in some cases, run on them.* » (p. 758).

Précisons ici que nous nous sommes essentiellement attardés aux carburants fossiles, sans toujours prendre en compte autant que nous l'aurions souhaité, l'ensemble des éléments qui devraient l'être dans une analyse globale d'un tel dossier, à savoir, notamment la taille et la consommation énergétique du parc automobile, les politiques publiques de transport, etc... autant de questions qui malgré leur pertinence dépassent largement l'ampleur d'un mémoire de maîtrise.

Ce mémoire, examinant l'ensemble des impacts potentiels de l'option cellulosique, est à notre connaissance tout premier du genre au Canada. Au moment où le Québec cherche à développer la filière de la biomasse forestière et finance une chaire de recherche à l'Université de Sherbrooke pour développer de nouveaux débouchés, ce mémoire insiste sur l'importance d'une analyse globale des carburants végétaux en développement, à travers une approche globale de l'ensemble du phénomène et possiblement une approche cycle de vie intégrant à la fois leurs bénéfices mais aussi de l'ensemble de leurs effets socio-environnementaux.

Réflexion à la suite de l'étude

« Cette insouciance fuite en avant transformant les « autos vertes à l'éthanol » en brouteuses de maïs transgénique en surplus, puis de cultures destinées aux biocarburants, risque non seulement d'aggraver les problèmes socio-économiques et environnementaux, mais aussi de compromettre le développement raisonné et harmonieux de nouvelles sources énergétiques .» (Vandelac et Beaudoin, 2007, p. 273)

L'émergence des enjeux de sécurité alimentaire a permis de mettre à l'avant-scène les carburants végétaux de 1^{ère} génération et de démythifier cette option en pointant ses nombreux effets pervers. Toutefois, cela a provoqué certaines conséquences inattendues. Si bien qu'alors que la littérature commençait à noter les conséquences socio-environnementales négatives de l'éthanol de 1^{ère}

génération, et à lui attribuer un bilan d'émission négatif de GES, les enjeux de sécurité alimentaire sont venus propulser au-devant de la scène les carburants de 2^{ième} génération, les présentant comme une nouvelle solution. En faisant de l'enjeu de la sécurité alimentaire l'enjeu prioritaire, on en est venu à reléguer au second rang les impacts potentiels de leur production sur l'environnement, en légitimant l'accélération de la transition vers les carburants de 2^{ième} génération. Comme le souligne pertinemment le Dr Donald Smith, de l'Université McGill, les ÉU sont davantage obsédés par leur sécurité énergétique que par les impacts sur l'environnement ou encore par les conséquences sociales de la production de carburants végétaux de manière intensive. On peut alors certainement penser qu'en masquant l'enjeu environnemental de cette manière, on en vient à négliger cet aspect des carburants végétaux de 2^{ième} génération. En fondant nos espoirs sur l'option cellulosique, on risque d'accélérer indûment sa mise en marché et d'engendrer des conséquences inattendues, toutes aussi importantes que celles qui ont voulu être évitées et résolues.

Les carburants végétaux : une fausse bonne idée?

La question de l'énergie nous touche très certainement. Nous vivons actuellement une augmentation marquée des prix du carburant. L'essence à la pompe a atteint 1,40\$ Can en octobre 2008, le prix du baril ne cessant de croître. La fin appréhendée du pétrole, ainsi que la rareté et la spéculation qui en découle, y sont très certainement pour quelque chose. Cette augmentation se répercute à tous les niveaux : tous les coûts augmentent, tout particulièrement le prix des denrées. La recherche de carburants alternatifs devient alors nécessaire à nos sociétés « pétrolivores ». L'éthanol-maïs porta un certain temps cet espoir, avant de devenir aujourd'hui une fausse-bonne idée. C'est lorsque l'on cherche à en faire la solution de rechange, même partielle, à notre consommation insoutenable de pétrole que les enjeux se posent. Actuellement, en cherchant à produire l'éthanol à partir de la cellulose, une composante cellulaire des plantes, on perpétue le modèle de développement à l'américain, centré essentiellement sur un parc automobile particulièrement énergivore et sur le transport individuel. Le fantasme énergétique de ce transport individuel repose alors sur la possibilité de faire fermenter l'ensemble du règne végétal, alors que les menaces économiques frappant les grands constructeurs automobiles (on le voit aujourd'hui à travers les risques de faillite de deux des trois grands de l'automobile aux ÉU, GM et Chrysler) risquent d'insuffler dans le parc automobile de plus petites cylindrées. Par ailleurs, on peut

également croire que la transformation et l'instabilité du secteur automobile traditionnel favoriseront l'émergence et le développement d'autres types d'énergies, tel l'hydrogène, destinées aux transports.

Les attentes, mises dans le développement de l'option cellulosique, semblent soumises à l'idée de répondre à la demande énergétique actuelle et celle anticipée – comme si les crises financières et économiques actuelles n'allaient pas modifier profondément les choses. Ce faisant, la plupart des chercheurs semblent davantage chercher l'alternative au pétrole qu'ils ne questionnent le phénomène d'une demande énergétique constamment grandissante. Face à des enjeux posant la question de nos modes de vie, de nos modes de production, de nos économies axées sur la consommation, quoi de mieux que de proposer une sortie de crise par la science et la technique. Les partisans de cette approche donnent aux carburants végétaux de 2^{ème} génération des attributs prometteurs, passant de la capacité à résoudre – potentiellement de manière définitive – les besoins énergétiques de l'humanité, à leur bien fait environnemental et à leur faible coût de production – une fois le déploiement total du génie génétique réalisé. Comme presque tout le monde s'entend sur l'ampleur des enjeux énergétiques et climatiques, le débat en vient alors à ne se focaliser que sur les chances du succès (Dessus, 2005). La question de l'image des carburants végétaux prend alors toute son importance. Là-dessus, les propos de McMillan⁵⁷ (1997) ainsi que d'Eaves et Eaves⁵⁸(2007) sont éloquentes. Le verdissement de l'opinion publique au sujet des carburants végétaux masque encore davantage les risques liés à leur production et à leur usage. Pensons seulement au développement de végétaux transgéniques pour le déploiement de la filière cellulosique.

Des pistes pour une alternative plus viable

Bien que les carburants végétaux puissent fournir une part de l'énergie nécessaire, les risques découlent davantage de l'intensité de nos besoins énergétiques et d'une production massive dans un contexte agro-industriel. Comme le soulignait Jean Ziegler, alors Rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation à l'ONU, il serait nécessaire d'imposer un moratoire sur la production de

⁵⁷ « *It is anticipated that the public's perception of the value of bioethanol technology will greatly influence the pace of commercialization* » (McMillan, 1997).

⁵⁸ « *Clearly, the promise of a «renewable» automobile fuel source is a major driving force behind support for ethanol* » (Eaves et Eaves, 2007).

carburants végétaux de 1^{ère} génération, tant pour la sécurité alimentaire mondiale que pour les conséquences environnementales qu'elle engendre. Nous ajoutons toutefois qu'une même logique devrait être appliquée à toute commercialisation future de la filière cellulosique, tout particulièrement si celle-ci se construit sur le déploiement de la transgénèse, notamment végétale, compte tenu des risques socio-environnementaux qu'elle laisse présager.

Nous constatons aujourd'hui l'ampleur de notre exposition aux produits de synthèse issus de la révolution verte. Nous commençons également à observer la toxicité engendrée par les OGM-pesticides destinés à l'agriculture (Séralini, 2005). La manipulation génétique de la voie de synthèse de la lignine, au profit d'une plus grande production de cellulose, risque-t-elle de se répercuter sur l'ensemble du monde végétal? Par exemple, les caractéristiques des nouveaux peupliers et saules OGM se transmettront-elles aux variétés naturelles? Comment se comporteront les microorganismes génétiquement construits pour dégrader la cellulose, s'ils viennent à s'introduire dans la nature, en particulier si leur tolérance à l'éthanol est augmentée et si la présence des composés constituant la barrière lignocellulosique des plantes est réduite? Avant de mettre en circulation davantage d'OGM, il faudrait peut-être considérer si l'enjeu énergétique vaut vraiment les risques de l'introduction de nouvelles variables génétiques dans la nature et possiblement dans notre assiette. L'alternative la plus viable repose paradoxalement sur la diminution de notre dépendance énergétique, ce qui implique, notamment, de revoir entièrement les sources énergétiques des transports.

APPENDICE A

Figure A.1	Différentes estimations de valeurs de BEN (<i>NEV</i>) à travers le temps en ML/J de l'éthanol-maïs	140
Figure A.2	Différentes estimations de valeurs de BEN en MJ/L pour l'éthanol-maïs en fonction de l'énergie fournie (<i>output</i>) et de l'énergie requise à sa production (<i>input</i>), selon six études. La valeur estimée du BEN pour chaque étude est indiquée par l'emplacement d'un point noir	141
Figure A.3	Représentation schématique des impacts de la production et de l'usage de l'éthanol sur l'environnement	142
Figure A.4	Évolutions des prix mondiaux des produits végétaux jusqu'en 2016	143
Figure A.5	Schéma synthétique de l'hydrolyse de la biomasse végétale en ses principaux composés (lignine, cellulose et hémicellulose)	144
Figure A.6	Les différents usages des résidus agricoles	145
Figure A.7	Les effets à court-terme et à long-terme du retrait des résidus agricoles	146

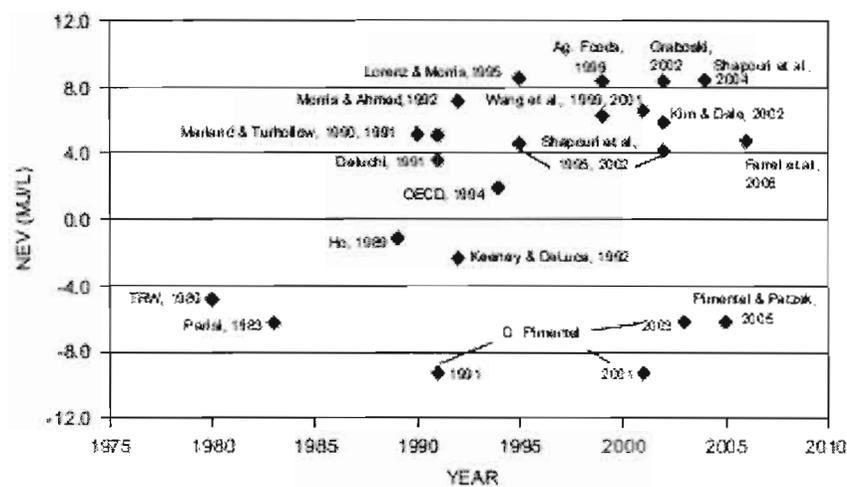


Figure A.1 Différentes estimations de valeurs de BEN (*NEV*) à travers le temps en ML/J de l'éthanol-mâis

(Tiré de Lavigne et Powers, 2007)

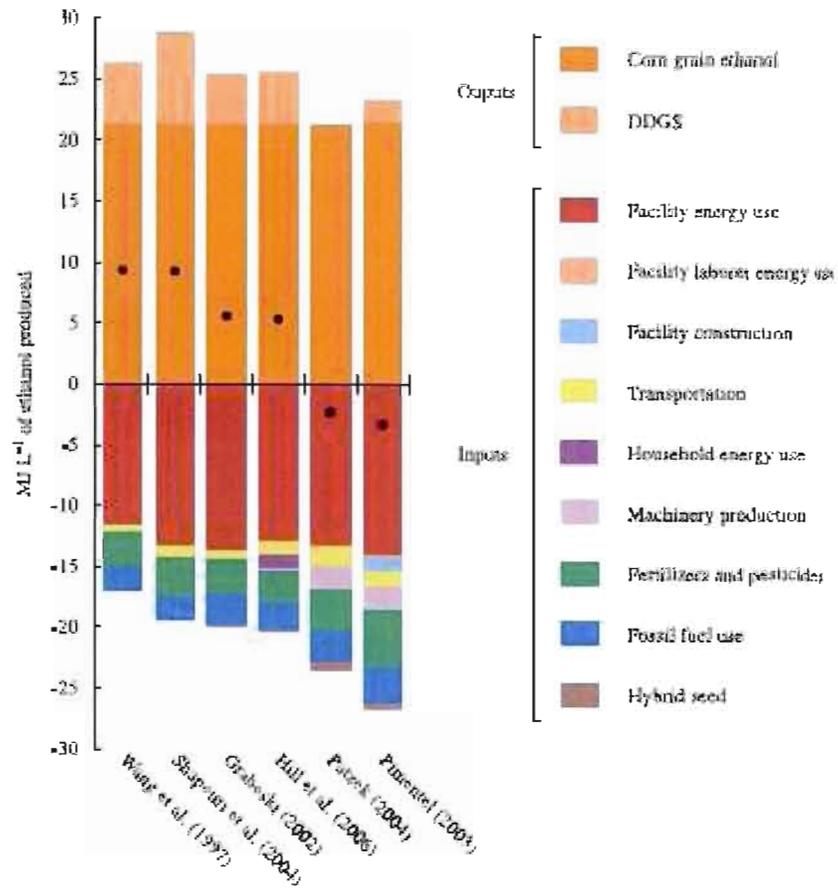


Figure A.2 Différentes estimations de valeurs de BEN en MJ/L pour l'éthanol-mais en fonction de l'énergie fournie (*output*) et de l'énergie requise à sa production (*input*), selon six études. La valeur estimée du BEN pour chaque étude est indiquée par l'emplacement d'un point noir.

(Tiré de Hill, 2007)

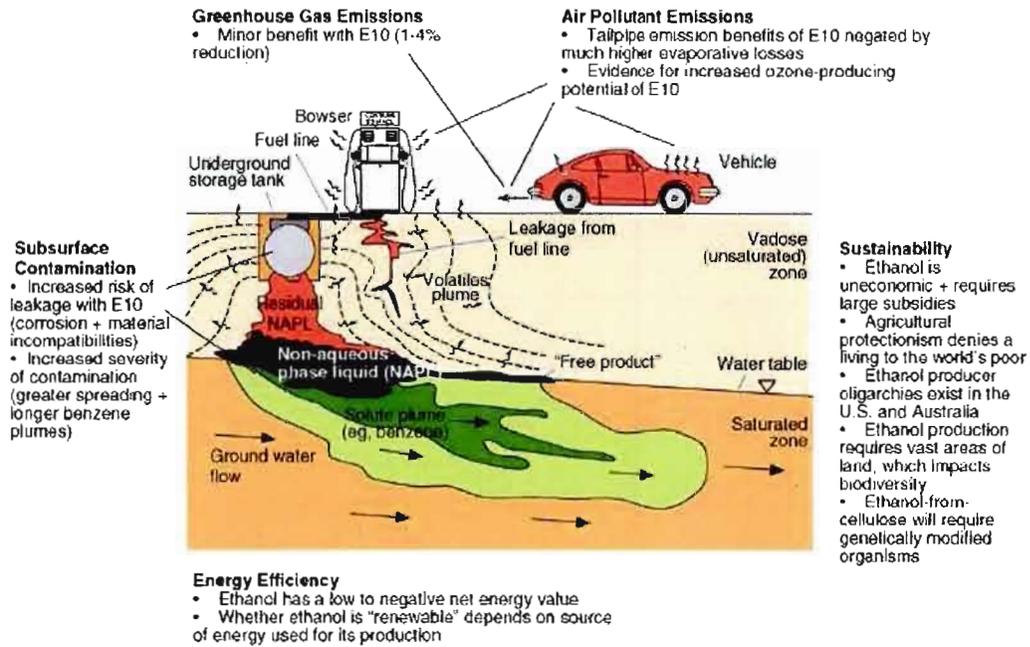
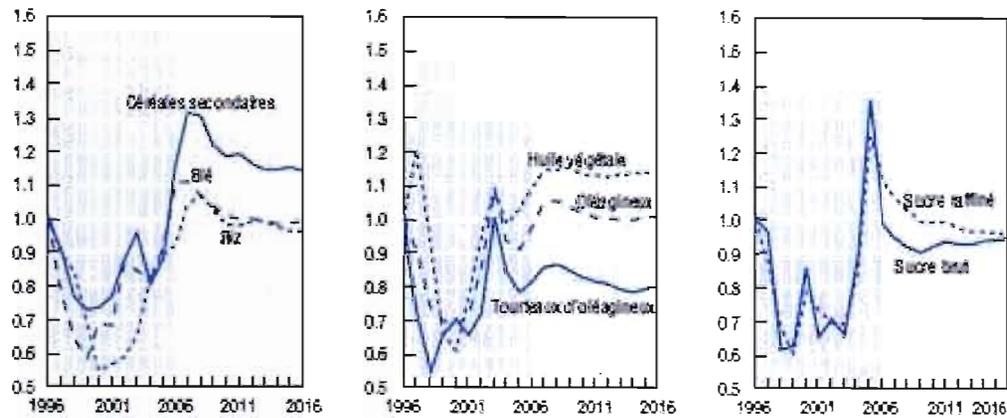


Figure A.3 Représentation schématique des impacts de la production et de l'usage de l'éthanol sur l'environnement

(Tiré de Niven, 2005)



Source : Secrétariats de l'OCDE et de la FAO.

Graphique 1.8. **Évolution des prix mondiaux des produits animaux jusqu'en 2016**
(Indice des prix nominaux, 1996 = 1)

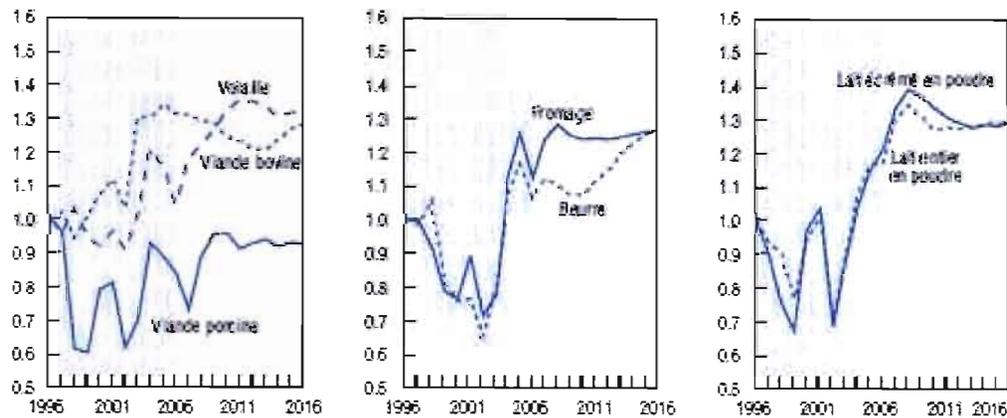


Figure A.4 Évolutions des prix mondiaux des produits végétaux jusqu'en 2016

(Tiré de OCDE/FAO, 2007)

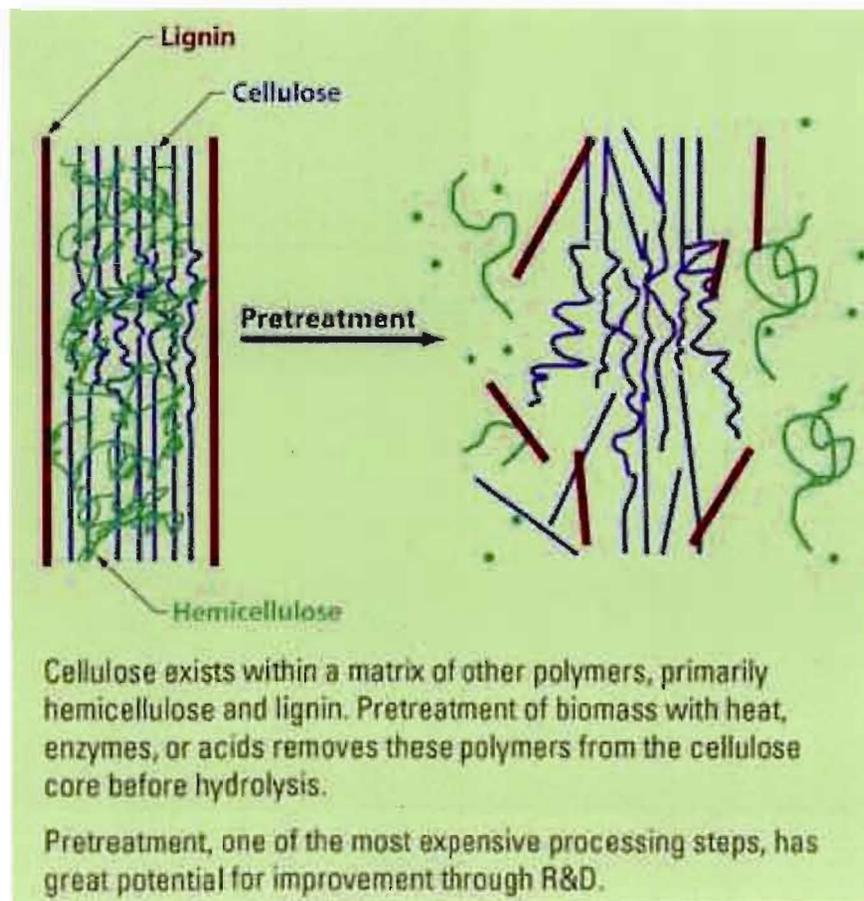


Figure A.5 Schéma synthétique de l'hydrolyse de la biomasse végétale en ses principaux composés (lignine, cellulose et hémicellulose)

(Tiré de USDOE, 2006)

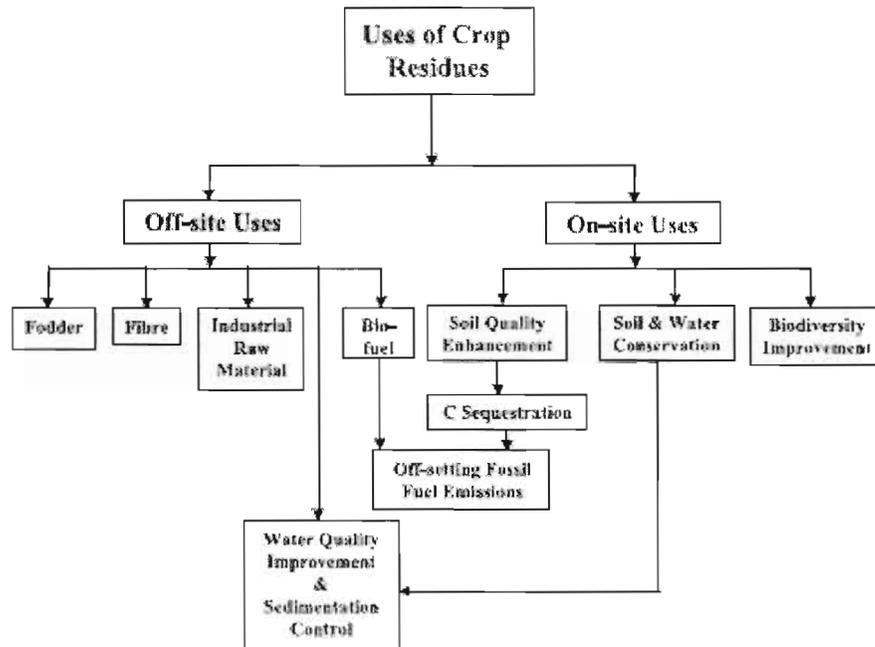


Figure A.6 Les différents usages des résidus agricoles
(Tiré de Lal, 2005)

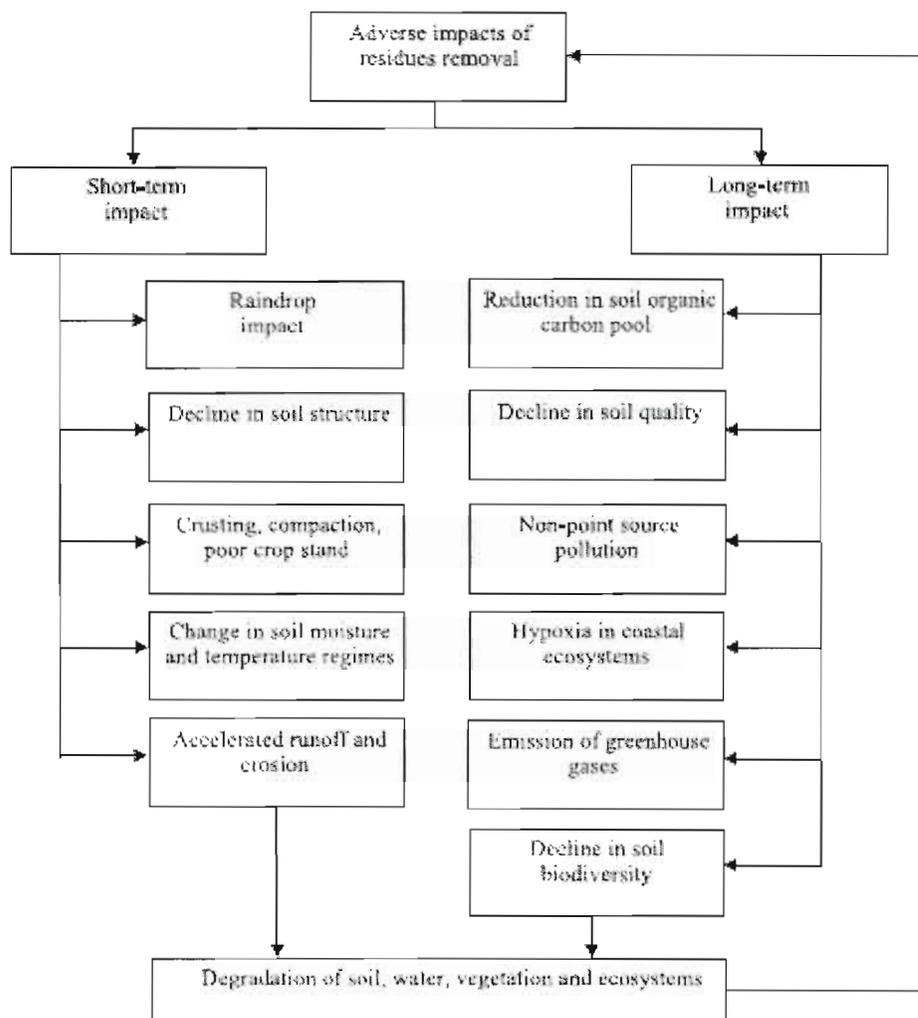


Figure A.7 Les effets à court-terme et à long-terme du retrait des résidus agricoles

(Tiré de Lal, 2005)

RÉFÉRENCES

- ACCR. 2007. «Association canadienne des carburants renouvelables - Canadian renewable fuels association». En ligne. <<http://www.greenfuels.org/>>. Consulté le 24 octobre 2007.
- ACCR. 2009. «Canadian Ethanol Production List». Association canadienne des carburants renouvelables - Canadian renewable fuels association. En ligne. <<http://greenfuels.org/lists.php#cthProd>>.
- ACI. 2003. *Demande de certificat d'autorisation. Approvisionnement en matière première (maïs-grain). Engagement de l'entreprise*, Projet de distillerie de Varennes: Les Alcools de Commerce inc, Copie de lettre obtenue du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, 4 p.
- Adviento-Borbe, M. A. A., M. L. Haddix, D. L. Binder, Daniel T. Walters et Achim Dobermann. 2007. «Soil Greenhouse Gas Fluxes and Global Warming Potential in Four High-Yielding Maize Systems». *Global Change Biology*. vol. 13, no 9 (septembre), p. 1972-1988.
- AFP, (Agence France-Presse). 1993. «Le gouvernement et les manufacturiers US créeront «ensemble» la voiture du 21^e siècle». *La Presse* (Montréal), p. C7.
- AFP, (Agence France-Presse). 2007. «Biocarburants ou eau: il faut choisir». *Cyberpresse*, jeudi le 16 août. En ligne. <<http://www.cyberpresse.ca/apps/pbcs.dll/article?AID=/20070816/CPMONDE/70816068/6108/CPENVIRONNEMENT&template=printart&print=1>>. Consulté le 17 décembre 2007.
- AIE. 2004. *Biofuels for Transport. An International Perspective*. Paris: Agence internationale de l'énergie, 210 p. En ligne. <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/frec/2004/biofuels2004.pdf>>. Consulté le 10 janvier 2008.
- AIE. 2006. *World Energy Outlook 2006*, no Résumé exécutif: Agence internationale de l'énergie, 12 p. En ligne. <http://www.worldenergyoutlook.org/docs/wco2006/french_sum_06.pdf>. Consulté le 17 février 2008.
- AIE. 2007. *World Energy Outlook 2007. Résumé exécutif*: Agence internationale de l'énergie. En ligne. <<http://www.iea.org/w/bookshop/add.aspx?id=319>>. Consulté le 17 février 2008.
- Al-Kaisi, Mahdi, et J. Guzman. 2007. «Residue Removal and Potential Environmental Consequences». *Integrated Crop Management*. vol. IC-498, no 7 (23 avril), p. 122-123. En ligne. <<http://www.ipm.iastate.edu/ipm/icm/2007/4-23/residuc.html>>. Consulté le 15 janvier 2008.

- Allmaras, R. R., D. R. Linden et C. E. Clapp. 2004. «Corn Residue Transformations into Root and Soil Carbon as Related to Nitrogen, Tillage, and Stover Management». *Soil Science Society of America Journal*. vol. 68, no 4 (juillet), p. 1366-1375.
- Altieri, Miguel A., et Elizabeth Bravo. 2007. «The Ecological and Social Tragedy of Crop-Based Biofuel Production in the Americas». *FoodFirst, Institut for food and development policy*, no 20 mars. En ligne. <<http://www.foodfirst.org/node/1662>>. Consulté le 18 novembre 2007.
- Andow, David A., Gabor L. Lövei et Salvatore Arpaia. 2006. «Ecological Risk Assessment for Bt Crops». *Nature biotechnology*. vol. 24, no 7 (juillet), p. 749-751.
- Anonyme. 2007. «Tortilla Crisis». *Alternatives Journal*. vol. 33, no 1, p. 7.
- Anslow, Mark. 2007. «Biofuels - Facts and Fictions». *The Ecologist*. vol. 37, no 3 (mars), p. 34-36.
- ASPO. 2007. *Association pour l'étude du pic de pétrole et de gaz naturel - The Association for the Study of Peak Oil and Gas*. En ligne. <<http://www.pcakoil.net/publications>>. Consulté le 20 janvier 2008.
- Augustyn, Heather. 2007. «A Burning Issue : Palm Oil Shows Promise as a Biofuel, but the Environmental Cost of Production can be High». *World Watch*. vol. 20, no 4 (juillet-août), p. 22-27.
- Banks, Sam N. K. 2008. *LS-587F - Projet de loi C-33 : Loi modifiant la Loi canadienne sur la protection de l'environnement de 1999*: Bibliothèque du Parlement - Service d'information et de recherche parlementaires, Division du droit et du gouvernement 9p. En ligne. <http://www.parl.gc.ca/common/bills_ls.asp?lang=F&ls=c33&source=library_prb&Parl=39&Ses=2>. Dernière modification le 3 juillet 2008 Consulté le 1^{er} août 2008.
- Bant, Marilyn Upah. 2007. «Tropical Maize for Biofuels». *Aces News*, no 16 octobre. En ligne. <<http://www.aces.uiuc.edu/news/stories/news4169.html>>. Consulté le 20 janvier 2008.
- Bastianoni, Simone, et Nadia Marchettini. 1996. «Ethanol Production from Biomass : Analysis of Process Efficiency and Sustainability». *Biomass and Bioenergy*. vol. 11, no 5, p. 411-418.
- BBC. 2008a. «World Bank tackles food emergency». no 14 avril. En ligne. <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/7344892.stm>>. Consulté le 2 mai 2008.
- BBC. 2008b. «Action to meet Asian rice crisis». no 17 avril. En ligne. <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/7352038.stm>>. Consulté le 2 mai 2008.
- Bell, Michelle L., Richard Goldberg, Christian Hogrefe, Patrick L. Kinney, Kim Knowlton, Barry Lynn, Joyce Rosenthal, Cynthia Rosenzweig et Jonathan A. Patz. 2007. «Climate Change, Ambient Ozone, and Health in 50 US Cities». *Climatic Change*. vol. 82, no 1-2 (mai), p. 61-76.
- Bellarby, Jessica, Bente Foerid, Astley Hastings et Pete Smith. 2008. *Cool Farming - Climate Impacts of Agriculture and Mitigation Potential*. Amsterdam (Pays-Bas): Greenpeace, 43 p. En ligne. <<http://www.greenpeace.org/international/press/reports/cool-farming-full-report>>. Consulté le 10 janvier 2008

- Benbrook, Charles M. 2004. «Genetically Engineered Crops and Pesticide Use in the United States : The First Nine Years». *BioTech InfoNet, Technical Paper*, no 7 (octobre).
- Berndes, Göran. 2002. «Bioenergy and Water - the Implications of Large-Scale Bioenergy Production for Water Use and Supply». *Global Environmental Change*. vol. 12, no 4 (décembre), p. 253-271.
- Berndes, Göran, Christian Azar, Tomas Kaberger et Dean Abrahamson. 2001. «The Feasibility of Large-Scale Lignocellulose-Based Bioenergy Production». *Biomass and Bioenergy*. vol. 20, no 5 (mai), p. 371-383.
- Berthiaume, Richard, Christian Bouchard et Marc A. Rosen. 2001. «Exergetic evaluation of the renewability of a biofuel». *Exergy, An International Journal*. vol. 1, no 4, p. 256-268.
- Bhattacharya, Prasenjit, Tom Barkley et Ken Parks. 2007. «La tortilla victime du boom de l'éthanol». *Courrier international*, no 848, p. 54.
- BIOBUS. 2003. *Rapport de fin de projet BIOBUS*. Montréal, 62 p. En ligne. <<http://www.biodieselquebec.org/Pages/documentation.html#rapportsprojets>>. Consulté le 10 décembre 2007.
- Biofuelwatch. 2007. *Agrofuels - Toward a Reality Check in Nine Key Areas*, 34 p. En ligne. <www.biofuelwatch.org.uk>. Consulté le 11 décembre 2007.
- BioMer. 2005. *Rapport de fin de projet - BioMer*. Montréal, 57 p. En ligne. <<http://www.biodieselquebec.org/Pages/documentation.html#rapportsprojets>>. Consulté le 10 décembre 2007.
- Bird, Kenneth J., Ronald R. Charpentier, Donald L. Gautier, David W. Houseknecht, Timothy R. Klett, Janet K. Pitman, Thomas E. Moore, Christopher J. Schenk, Marilyn E. Tennyson et Craig R. Wandrey. 2008. «Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle». *U.S. Geological Survey*, no juillet. En ligne. <<http://pubs.usgs.gov/fsi/2008/3049/fsi2008-3049.pdf>>. Consulté le 3 août 2008.
- Blanco-Canqui, Humberto, et Rattan Lal. 2007. «Soil and Crop Response to Harvesting Corn Residues for Biofuel Production». *Geoderma*. vol. 141, no 3-4 (15 octobre), p. 355-362.
- Blanco-Canqui, Humberto, Rattan Lal, W. M. Post, R. C. Izaurralde et M. J. Shipitalo. 2007. «Soil Hydraulic Properties Influenced by Corn Stover Removal from No-Till Corn in Ohio». *Soil and Tillage Research*. vol. 92, p. 144-155.
- Blanco-Canqui, Humberto, Rattan Lal, W. M. Post et L. B. Owens. 2006. «Changes in Longterm No-Till Corn Growth and Yield Under Different Rates of Stover Mulch». *Agronomy Journal*. vol. 98, no 4 (juillet-août), p. 1128-1136.
- Borde, Valéric. 2005. «Le mirage de l'éthanol». *L'Actualité*. vol. 30 (suppl. Géographica), no 5 (1er avril), p. 14-18.
- Borlaug, Normand. 2007. «Feeding a Hungry World». *Science*. vol. 318, no 5849 (19 octobre), p. 359.
- Boullard, Bernard. 1988. *Dictionnaire de botanique*. Paris: Ellipses, 398 p.

- BP. 2007. «The British Petroleum Statistical Review of World Energy - 2006. In Review : Oil Reserves». British Petroleum. En ligne. <<http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9017902&contentId=7033474>>. Consulté le 6 novembre 2007.
- Brown, Lester R. 2006a. «Starving for Gas?». *The Humanist*. vol. 66, no 5, p. 30-32.
- Brown, Lester R. 2006b. «Exploding U.S. Grain Demand for Automotive Fuel Threatens World Food Security and Political Stability». *Earth Policy Institute*, no 3 novembre. En ligne. <<http://www.earthpolicy.org/Updates/2006/Update60.htm> & http://www.earthpolicy.org/Updates/2006/Update60_data.htm>. Consulté le 12 janvier 2008.
- Burt, Andrew. 2006. «Is Corn Stover a Waste? Economic and Agronomic Considerations of Corn Residue Removal». In *PLNT6250 - Colloquium in Plant Agriculture - Fall 2006 "Bioproducts in the Context of Ontario's Agricultural and Manufacturing Industries"*. En ligne. <<http://www.bioproductsatguelph.ca/newsevt/colloquium/index.html>>. Consulté le 18 décembre 2007.
- Bush, George W. 2007a. «President Bush Delivers State of the Union Address ». The White House. En ligne. <<http://www.whitehouse.gov/news/releases/2007/01/20070123-2.html>>. Consulté le 5 janvier 2008.
- Bush, George W. 2007b. «Energy : Twenty in Ten : Strengthening America's Energy Security In «State of the Union Policy Initiatives»». The White House. En ligne. <<http://www.whitehouse.gov/stateoftheunion/2007/initiatives/energy.html>>. Consulté le 5 janvier 2008.
- Canada. 1999. *Étude de cas sur le MMT (méthylcyclopentadiényl manganèse tricarbonyle)*: Table ronde nationale sur l'environnement et sur l'économie, 19 p. En ligne. <<http://www.nrtcc-trnee.ca/fra/publications/etudes-de-cas/sante/index-mmt-etude-de-cas-fra.html>>. Consulté le 2 juillet 2008.
- Canada. 2006a. *Gazette du Canada Partie 1*. vol. 140, no 52 (30 décembre), p. 4523-4598. En ligne. <<http://canadagazette.gc.ca/part1/2006/20061230/pdf/g1-14052.pdf>>. Consulté le 26 janvier 2008.
- Canada, Agence des services frontaliers. 2008a. «Avis de modification tarifaire - TN-31. Le 14 mars 2008. Modification apportée à la Loi de la taxe d'accise». En ligne. <<http://www.cbsa-asfc.gc.ca/trade-commerce/tariff-tarif/2008/tn31-fra.html>>. Consulté le 7 avril 2008.
- Canada, Agriculture et Agroalimentaire. 2007a. «Discours pour l'Honorable Chuck Strahl, ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire et ministre de la Commission canadienne du blé. Annonce d'un financement additionnel pour la science et l'innovation en agriculture (Saskatchewan)». Gouvernement du Canada. En ligne. <http://agr.gc.ca/cb/min/index_f.php?s1=dis-spe&s2=2007&page=s070212>. Dernière modification le 2007-02-14. Consulté le 1^{er} mai 2008.
- Canada, Agriculture et Agroalimentaire. 2007b. «Programmes et services». Gouvernement du Canada. En ligne. <http://www.agr.gc.ca/index_f.php?s1=prog>. Dernière modification le 24 septembre 2007. Consulté le 24 octobre 2007.

- Canada, Agriculture et Agroalimentaire. 2000. *Assessment of Net Emissions of Greenhouse Gases From Ethanol-Gasoline Blends in Southern Ontario*. R-2000-1. Richmond, C.B.: Rapport préparé par Levelton Engineering Ltd., 75 p. En ligne.
<<http://www.tc.gc.ca/programs/Environment/climatechange/studies.htm>>.
- Canada, Environnement. 2003b. «Utilisation dans les véhicules à essence de mélanges éthanol-essence contenant plus de 10 p. 100 en volume d'éthanol». Gouvernement du Canada. En ligne.
<<http://www.ec.gc.ca/cleanair-airpur/CAOL/transport/publications/ethgas/ethgastocfr.htm>>.
Dernière modification le 4 avril 2003. Consulté le 11 décembre 2007.
- Canada, Environnement. 2005a. «Glossaire». Gouvernement du Canada. En ligne.
<<http://www.ec.gc.ca/cppic/fr/glossary.cfm#R>>. Dernière modification le 19 avril 2005.
Consulté le 24 février 2008.
- Canada, Gouvernement du. 2007c. «Événements économiques clés. 1973 - Crise du pétrole de l'OPEP : Hausse forcée des prix mondiaux du pétrole». En ligne.
<<http://www.canadianeconomy.gc.ca/francais/economy/1973opec.html>>. Dernière modification le 4 mai 2007. Consulté le 19 avril 2008.
- Canada, Gouvernement du. 2007d. «Glossaire». En ligne.
<<http://www.biofondations.gc.ca/francais/Vicw.asp?mid=426&x=696>>. Dernière modification le 14 juin 2007. Consulté le 24 février 2008.
- Canada, Gouvernement du. 2008b. «ÉcoAGRICULTURE. Des carburants renouvelables pour un avenir plus écologique». En ligne. <<http://www.ecoaction.gc.ca/ccoagriculture/index-fra.cfm>>. Dernière modification le 7 juillet 2008. Consulté le 28 juillet 2008.
- Canada, Ministère des Finances. 2007e. «Chapitre 3. Un Canada meilleur». In *Le plan budgétaire de 2007. Viser un Canada plus fort, plus sécuritaire et meilleur.*, p. 55-110. Ottawa: Gouvernement du Canada. En ligne. <<http://www.budget.gc.ca/2007/bp/bptocf.html>>.
Consulté le 24 octobre 2007.
- Canada, ressources naturelles. 2007f. «L'éthanol». Gouvernement du Canada. En ligne.
<<http://oee.nrcan.gc.ca/transports/carburants/ethanol/ethanol.cfm>>. Consulté le 24 octobre 2007.
- Canada, ressources naturelles. 2007g. «Biocarburants de la prochaine génération». Gouvernement du Canada. En ligne. <<http://www.oee.nrcan.gc.ca/transports/biocarburant-prochaine-gen.cfm?attr=0>>. Consulté le 24 octobre 2004.
- Canada, ressources naturelles. 2008c. «Programme d'expansion de l'éthanol». Gouvernement du Canada. En ligne.
<<http://www.oee.nrcan.gc.ca/transports/carburants/ethanol/pemc.cfm?attr=8>>. Consulté le 10 mars.
- Canada, ressources naturelles. 2008d. «La stratégie du gouvernement du Canada sur les carburants renouvelables». Gouvernement du Canada. En ligne.
<<http://www.oee.nrcan.gc.ca/transports/entreprises/que-fait-le-gouvernement.cfm?attr=16>>.
Consulté le 7 février 2008.

- Canada, Santé Canada. 2007h. «Executive Summary : Health Canada Ethanol Expert Panel Workshop Report - Executive Summary». Gouvernement du Canada. En ligne. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-sem/air/out-ext/effe/ethanol/index_e.html>. Dernière modification le 9 mars 2007. Consulté le 15 janvier 2008.
- Canada, Statistique Canada. 2004. *L'activité humaine et l'environnement. Statistiques annuelles 2004. Article de fond. L'énergie au Canada*. Ottawa: Gouvernement du Canada, 106 p. En ligne. <<http://www.statcan.ca/francais/freepub/16-201-XIF/0000416-201-XIF.pdf>>. Consulté le 25 novembre 2007.
- Canada, Statistique Canada. 2005b. *Série de rapports sur les grandes cultures*, no 8: Gouvernement du Canada, p. 22 p. En ligne. <<http://www.statcan.ca/francais/freepub/22-002-XIB/0080522-002-XIB.pdf>>. Consulté le 25 octobre 2007.
- Canada, Statistique Canada. 2006b. *L'activité humaine et l'environnement. Statistiques annuelles*. Ottawa: Gouvernement du Canada, 165 p. En ligne. <<http://www.statcan.ca/francais/freepub/16-201-XIF/16-201-XIF2006000.pdf>>. Consulté le 5 novembre 2007.
- Canada, Statistique Canada. 2008e. *La revue des céréales et des graines oléagineuses*, no 22-007-X. Ottawa: Gouvernement du Canada, 52 p.
- Cans, Roger. 1994. «Les substituts de l'or noir». *Le Devoir* (Montréal), 25 mai, p. B1.
- Cardinal, François. 2007. «Québec largue l'éthanol. La culture intensive du maïs nuit à l'environnement». *La Presse* (Montréal), vendredi le 9 novembre, p. A1.
- Carey, John, Adrienne Carter et Assif Shameen. 2007. «Food vs. Fuel ; As Energy Demands Devour Crops once Meant for Sustenance, the Economics of Agriculture are Being Rewritten». *Business Week*, no 4020 (5 février), p. 80.
- CBD. 2007. *Annex 1. Recommendations Adopted by the Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice at its Twelfth Meeting*. Paris: Convention pour la diversité biologique, UNEP/CBD/COP/9/2, pp. 21-39. En ligne. <<http://www.cbd.int/doc/recommendations/SBSTTA-12-rec-en.pdf>>. Consulté le 27 janvier 2008.
- CEO. 2007. «The EU's Agrofuel Folly : Policy Capture by Corporate Interests». Corporate Europe Observatory, Briefing paper En ligne. <<http://www.corporateeurope.org/agrofuelfolly.html>>. Consulté le 15 février 2008.
- Chakravorty, Ujjayant, Bertrand Magné et Michel Moreaux. 2007. «A dynamic model of food and clean energy». *Journal of Economic Dynamics & Control*. vol. Sous presse, épreuve corrigée, no Disponible en ligne le 29 mai, 9 p.
- Chan, Albert W., Robert Hoffman et Bert McInnis. 2004. «The Role of Systems Modeling for Sustainable Development Policy Analysis : the Case of Bio-Ethanol». *Ecology and Society*. vol. 9, no 2, 17 p. En ligne. <<http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art6>>. Consulté le 15 décembre 2008.

- Charrette, Benoit. 2003. «L'éthanol, plus propre que l'essence». *La Presse* (Montréal), lundi 10 mars, p. 16.
- Chevrier, Jacques. 2004. «La spécification de la problématique». In *Recherche sociale. De la problématique à la collecte des données*, Benoit Gauthier, p. 51-84. Sainte-Foy (Québec): Presses de l'Université du Québec.
- Cho, Adrian. 2007. «Catalyzing the Emergence of a Practical Biorefinery». *Science*. vol. 315, no 5813 (9 février), p. 795.
- Chum, Helena L., et Ralph P. Overend. 2001. «Biomass and Renewable Fuels». *Fuel Processing Technology*. vol. 71, no 1-3 (juin), p. 187-195.
- Chum, Helena Li, Ralph Overend et Julie A. Phillips. 1993. «The Great Energy Harvest». *The Futurist*. vol. 27, no 3 (mai-juin), p. 34-40.
- Clive, James. 2008. *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008. ISAAA Brief No. 39*. Ithaca, NY: ISAAA.
- Cole, C.V., J. Duxbury, J. Freney, O. Heinemeyer, K. Minami, A. Mosier, k. Paustian, N. Rosenberg, N. Sampson, D. Sauerbeck et Q. Zhao. 1997. «Global Estimates of Potential Mitigation of Greenhouse Gas Emissions by Agriculture». *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. vol. 49, no 1-3 (juillet), p. 221-228.
- Comeau, Yvan. 1994. *L'analyse des données qualitatives*, no cahier no 94-02. Montréal: Collectif de recherche sur les innovations sociales dans les entreprises et les syndicats (CRISES), 31 p.
- Contandriopoulos, André-Pierre, François Champagne, Louise Potvin, Jean-Louis Denis et Pierre Boyle. 2005. *Savoir préparer une recherche. La définir, la structurer, la financer*. Montréal: Gaëtan Morin éditeur, 197 p.
- Côté, Charles. 2007. «L'éthanol menace les réserves d'eau douce». *La Presse* (Montréal), lundi 15 octobre, p. A16.
- CQB. 2007. «Site du Conseil québécois du biodiésel». En ligne. <<http://www.biodieselquebec.org>>. Consulté le 13 novembre 2007.
- Crutzen, Paul J., A. R. Mosier, K. A. Smith et W. Winiwarter. 2007. «N₂O Release from Agro-Biofuel Production Negates Global Warming Reduction by Replacing Fossil Fuels». *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. vol. 7, no 4, p. 11191-11205.
- Darier, Éric. 2007. «Agrocarburants. Nourrir le monde ou les automobiles?». *Réseau vert*. vol. 15, no 3 (automne), p. 5.
- Darier, Éric, et Frédéric Martel. 2005. *À la recherche de stratégies de soutien pour l'agriculture durable au Canada* (Québec, du 6 au 9 novembre 2005). Greenpeace Greenpeace - Ébauche (version préliminaire datant du 28 octobre 2005), 33 p.
- De La Torre Ugarte, Daniel G. 2005. «The Contribution of Bioenergy to a New Energy Paradigm». *EuroChoices*. vol. 4, no 3 (novembre), p. 6-13.

- De La Torre Ugarte, Daniel G., Burton C. English et Kim Jensen. 2007. «Sixty Billion Gallons by 2030: Economic and Agricultural Impacts of Ethanol and Biodiesel Expansion». *American Journal of Agricultural Economics*. vol. 89, no 5 (décembre), p. 1290-1295.
- De La Torre Ugarte, Daniel G., Marie E. Walsh, Hosein Shapouri et Stephen P. Slinsky. 2003. *The Economic Impacts of Bioenergy Crop Production on U.S. Agriculture*, no Agricultural Economic Report No. 816: USDOE et USDA, 40 p. En ligne.
<<http://www.p2pays.org/ref/17/16277.pdf>>. Consulté le 13 décembre 2007.
- de Oliveira, Adilson. 1991. «Reassessing the Brazilian Alcohol Programme». *Energy Policy*. vol. 19, no 1 (janvier-février), p. 47-55.
- De Oliveira, Marcelo E. Dias, Burton E. Vaughan et Edward J. Rykiel Jr. 2005. «Ethanol as Fuel : Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint». *BioScience*. vol. 55, no 7 (1er juillet), p. 593-602.
- Dessus, Benjamin. 2005. «L'alibi des utopies technologiques». *Manière de voir*. vol. 81, no juin-juillet, p. 61-64.
- Dhugga, Kanwarpal S. 2007. «Maize Biomass Yield and Composition for Biofuels». *Crop Science*. vol. 47, no 6 (7 novembre), p. 2211-2227.
- di Pardo, J. 2000. *Outlook for Biomass Ethanol Production and Demand*. Washington, DC: Energy Information Agency, 14 p. En ligne.
<<http://www.eia.doe.gov/oiaf/analysispaper/pdf/biomass.pdf>>. Consulté le 15 décembre 2007.
- Dobriansky, Paula 2006. «Clean Energy for Tomorrow». *eJournal USA. Economic Perspectives. Clean Energy Solutions*. vol. 11, no 2 (juillet), p. 4-7. En ligne.
<<http://usinfo.state.gov/journals/its/0706/ijec/ijec0706.pdf>>. Consulté le 3 décembre 2007.
- Donner, Simon D., et Christopher Kucharik. 2008. «Corn-Based Ethanol Production Compromises Goal of Reducing Nitrogen Export by the Mississippi River». *Proceedings of the National Academy of Sciences*. vol. 105, no 11, p. 4513-4518.
- Doornbosch, Richard, et Ronald Steenblik. 2007. *Biofuels : Is the Cure Worse than the Disease?* Coll. «Round Table on Sustainable Development». Paris: Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), 53 p.
- Douville, M., F. Gagné, C. Blaise et C. André. 2007. «Occurrence and Persistence of *Bacillus thuringiensis* (Bt) and Transgenic Bt Corn cry1Ab Gene from an Aquatic Environment». *Ecotoxicology and Environmental Safety*. vol. 66, no 2 (février), p. 195-203.
- Dufey, Annie. 2007. *International Trade in Biofuels : Good for Development? And Good for Environment?* : International Institut for environment and Development 4 p. En ligne.
<<http://www.iied.org/pubs/pdfs/11068IIED.pdf>>. Consulté le 18 janvier 2008.
- Dukes, Jeffrey. 2003. «Burning Buried Sunshine : Human Consumption of Ancient Solar Energy». *Climatic Change*. vol. 61, no 1-2 (novembre), p. 31-44.

- EAA. 2005. *Energy Security: Ethanol Across America*, 7 p. En ligne. <http://ethanol.org/pdf/contentmgmt/Energy_Security_Issue_Brief.pdf>. Consulté le 20 février 2008.
- Eaves, James, et Stephen Eaves. 2007. «Renewable Corn-Ethanol and Energy Security». *Energy Policy*. vol. 35, no 11 (novembre), p. 5958-5963.
- Eckhart, Michael 2006. «Renewables : Looking Toward Incxhaustible Energy». *eJournal USA. Economic Perspectives. Clean Energy Solutions*. vol. 11, no 2 (juillet), p. 22-28. En ligne. <<http://usinfo.state.gov/journals/ites/0706/ijee/eckhart.htm>>. Consulté le 3 décembre 2007.
- EERE. 2003. *Biomass program. Multi-year technical plan: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy*, 177 p. En ligne. <[Http://devafdc.nrel.gov/biogeneral/Program_Review/MYTP.pdf](http://devafdc.nrel.gov/biogeneral/Program_Review/MYTP.pdf)>. Consulté le 12 février 2008.
- EIA. 2008. *Annual Energy Outlook 2008 With Projections to 2030*, no Report #:DOE/EIA-0383(2008). Washington, DC: Energy Information Administration, Office of Integrated Analysis and Forecasting, 215 p. En ligne. <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/index.html>>. Consulté le 20 juin 2008.
- EWG. 2007. *Crude oil : the supply outlook*. Ottobrunn, Allemagne: Energy Watch Group, 101 p.
- FAO. 2002. «La FAO dévoile le Programme mondial de lutte contre la faim: 24 milliards de dollars d'investissements publics supplémentaires par an». *FAO Salle de Presse*, 4 juin. En ligne. <<http://www.fao.org/french/newsroom/news/2002/5500-fr.html>>. Consulté le 12 janvier 2008.
- FAO. 2006. *Perspectives de l'alimentation*, no 2 (décembre): Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture - Food and agriculture organisation. En ligne. <<http://www.fao.org/docrep/009/j8126e/j8126e00.htm>>. Consulté le 20 mai 2007.
- FAO. 2008. «Mesures urgentes pour contrer la flambée des prix des denrées alimentaires - Le rôle de l'agro-industrie souligné par la FAO, le FIDA et l'ONUDI». *FAO Salle de Presse* (New Delhi), 9 avril. En ligne. <<http://www.fao.org/newsroom/fr/news/2008/1000823/index.html>>. Consulté le 9 avril 2008.
- Fargione, Joseph, Jason Hill, David Tilman, Stephen Polasky et Peter Hawthorne. 2008. «Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt». *Science*. vol. 319, no 5867 (29 février), p. 1235-1238.
- Farrell, Alexander E., Richard J. Plevin, Brian T. Turner, Andrew D. Jones, Michael O'Hare et Daniel M. Kammen. 2006. «Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals». *Science*. vol. 311, no 5760 (27 janvier), p. 506-508.
- Ferreri, R. 2005. «Entretien avec Olivier Clain». *Synapse*, no 215 (mai), p. 9-14. En ligne. <http://classiques.uqac.ca/contemporains/clain_olivier/entretien_2005/Entretien_2005.pdf>. Consulté le 22 novembre 2007.
- Filion, Nadine, François Normand et Alexis Beauchamp. 2007. «L'éthanol de la discorde». *Affaires*. vol. 79, no 22 (7 juillet), p. 6-8.

- Follett, R. F. 2001. «Soil Management Concepts and Carbon Sequestration in Cropland Soils». *Soil and Tillage Research*. vol. 61, no 1-2 (août), p. 77-92.
- Forge, Frédéric. 2007. «Les biocarburants - Politique énergétique, environnementale ou agricole?». Bibliothèque du parlement - Division des sciences et de la technologie. En ligne. <<http://www.parl.gc.ca/information/library/PRBpubs/prb0637-f.htm>>. Dernière modification le 8 février 2007. Consulté le 7 janvier 2008.
- Fourez, Gérard. 1994. *Alphabétisation scientifique et technique : essai sur la finalités de l'enseignement des sciences*. Bruxelles De Boeck-Wesmael, 218 p.
- Fourez, Gérard, Véronique Englebert-Lecomte et Philippe Mathy. 1997. *Nos savoirs sur nos savoirs. Un lexique d'épistémologie pour l'enseignement*. Paris: De Boeck Université, 169 p.
- Fournier, Lise. 2007. «Hausse de 6% du prix des terres agricoles». *Le Soleil* (Québec), vendredi le 18 mai, p. 43.
- Francoeur, Louis-Gilles. 2007a. «Le Québec entre de plain-pied dans la carburoculture». *Le Devoir* (Montréal), samedi 19 et dimanche 20 mai.
- Francoeur, Louis-Gilles. 2007b. «Nourrir les humains avant les VUS». *Le Devoir* (Montréal), jeudi le 10 mai, p. a4.
- Frénière, Lucie. 1993. «Un mélange d'éthanol obtenu du maïs». *Le Droit*, p. 10.
- Frigon, Mathieu. 2007. «Les facteurs économiques derrière la production d'éthanol de maïs : Aperçu de l'expérience américaine récente». Bibliothèque du Parlement - Division de l'économie. En ligne. <<http://www.parl.gc.ca/information/library/PRBpubs/prb0702-f.htm>>. Dernière modification le 31 mai 2007. Consulté le 15 avril 2008.
- Gagné, Stéphane. 1994. «Des véhicules propulsés au maïs?». *Bulletin des agriculteurs*. vol. 77, no 8 (juillet-août), p. 36-39.
- Gendron, Guy, et Germain Thibault. 2007. «Éthanol : la fièvre verte». *Société Radio-Canada. Émissions «Enquêtes»*. (Montréal), Reportage télévisé, 9 novembre. En ligne. <http://www.radio-canada.ca/audio-video/pop.shtml#idMedia=0&urlMedia=/medianet/2007/CBFT/EnqueteCombo20071108210_0.asx>. Consulté le 27 janvier 2008.
- GenewatchUK. 2008. *GM Contamination Register. Report 2007. Annual review of cases of contamination, illegal planting and negative side effects of genetically modified organisms*. Amsterdam: Greenpeace, 43 p. En ligne. <http://gmcontaminationregister.org/index.php?content=nw_dctail1>. Consulté le 7 mars 2008.
- Gerard, Claudia, et Virginie Poullain. 2005. «Variation in the response of the invasive species *Potamopyrgus antipodarum* (Smith) to natural (cyanobacterial toxin) and anthropogenic (herbicide atrazine) stressors». *Environmental Pollution*. vol. 138, no 1 (novembre), p. 28-33.

- Gergely, Andreas. 2007. «Biofuels Worsen Hungary's Drought, Expert Says.». *ENN (Environmental news network)* (Budapest), 20 septembre. En ligne.
<<http://www.enn.com/energy/article/23222>>. Consulté le 20 novembre 2007.
- Giampietro, Mario, Sergio Ulgiati et David Pimentel. 1997. «Feasibility of Large-Scale Biofuel Production : Does an Enlargement of Scale Change the Picture?». *BioScience*. vol. 47, no 9 (octobre), p. 587-600.
- GIEC. 2001. «The Climate System : an Overview». In *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, p. 85-98: Groupe d'experts intergouvernementale sur l'évolution du climat - PNUE. En ligne.
<http://www.grida.no/CLIMATE/IPCC_TAR/WG1/index.htm>. Consulté le 15 mars 2007.
- GIEC. 2007a. *Climate Change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers*: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 21 p. En ligne. <<http://www.ipcc.ch/>>. Consulté le 25 mai 2008.
- GIEC. 2007b. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report. Summary for Policymakers*: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. En ligne. <<http://www.ipcc.ch/>>. Consulté le 25 mai 2008.
- GIEC. 2007c. *Climate Change 2007 : Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Fourth Assessment Report. Summary for Policymakers*: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. En ligne.
<<http://www.ipcc.ch/>>. Consulté le 25 mai 2008.
- Gilbert, Richard, et Anthony Perl. 2007. *Transport Revolutions . Moving People and Freight Without Oil*. Londre: Earthscan, 304 p.
- Gilland, Bernard. 2006. «Population, Nutrition and Agriculture». *Population & Environment*. vol. 28, no 1 (septembre), p. 1-16.
- Graham, Robin L., Richard Nelson, John Sheehan, Robert D. Perlack et Lynn L. Wright. 2007. «Current and Potential U.S. Corn Stover Supplies». *Agronomy Journal*. vol. 99, no 1, p. 1-11.
- GRAIN. 2007a. «In this Special Agrofuels Issue...». *Seedling*, no Agrofuels special issue (juillet), p. 1.
- GRAIN. 2007b. «Stop the Agrofuel Craze!». *Seedling*, no Agrofuels special issue (juillet), p. 2-9.
- GRAIN. 2007c. «Corporate Power. Agrofuels and the Expansion of Agrobusiness». *Seedling*, no Agrofuels special issue (juillet), p. 10-24.
- Gray, Kevin A., Lishan Zhao et Mark Emptage. 2006. «Bioethanol». *Current Opinion in Chemical Biology*. vol. 10, no 2 (avril), p. 141-146.
- Greene, Nathanael. 2004. *Growing Energy : How Biofuels can Help end America's Oil Dependence*. New York: Natural Resources Defense Council (NRDC), 78 p. En ligne.
<www.nrdc.org/air/energy/biofuels/biofuels.pdf>. Consulté le 27 novembre 2007.

- Greene, Nathanael, et Yerina Mugica. 2005. *Bringing Biofuels to the Pump. An Aggressive Plan for Ending America's Oil Dependence*: Natural Resources Defense Council (NRDC), 20 p. En ligne. <<http://www.nrdc.org/air/energy/pump/contents.asp>>. Consulté le 27 novembre 2007.
- Greenpeace. 2007. *How the Palm Oil Industry is Cooking the climate*, 66 p. En ligne. <<http://www.greenpeace.org/international/press/reports/cooking-the-climate-full>>. Consulté le 20 novembre 2007.
- Greenwood, John. 2007. «Buying Up the Farm ; Oilpatch Entrepreneurs Raid Saskatchewan for Land». *National Post* (Don Mills, Ontario), 26 mai, p. FP.3.
- Groom, Martha J., Elizabeth M. Gray et Patricia A. Townsend. 2008. «Biofuels and Biodiversity: Principles for Creating Better Policies for Biofuel Production». *Conservation Biology*. vol. Article sous presse, épreuve corrigé, p. 1-8.
- Hall, David O., et J. I. Scrase. 1998. «Will Biomass be the Environmentally Friendly Fuel of the Future?». *Biomass and Bioenergy*. vol. 15, no 4-5, p. 357-367.
- Hammerschlag, Roel. 2006. «Ethanol's Energy Return on Investment : a Survey of the Literature 1990-Present». *Environmental science and technology*. vol. 40, no 6 (mars), p. 1744-1750.
- Hancock, Jessica E., Wendy M. Loya, Christian P. Giardina, Laigeng Li, Vincent L. Chiang et Kurt S. Pregitzer. 2007. «Plant Growth, Biomass Partitioning and Soil Carbon Formation in Response to Altered Lignin Biosynthesis in *Populus tremuloides*». *New Phytologist*. vol. 173, no 4, p. 732-742.
- Hanegraaf, Marjolaine C., Edo E. Biewinga et Gert van der Bul. 1998. «Assessing the Ecological and Economic Sustainability of Energy Crops». *Biomass and Bioenergy*. vol. 15, no 4-5, p. 345-355.
- Heaton, Emily A., John Clifton-Brown, Thomas B. Voigt, Michael B. Jones et Stephen P. Long. 2004. «*Miscanthus* for renewable Energy Generation : European Union Experience and Projections for Illinois». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. vol. 9, no 4 (octobre), p. 433-451.
- Herrera, Stephan. 2006. «Bonkers about biofuels». *Nature biotechnology*. vol. 24, p. 755-760.
- Hettenhaus, J. R., R. Wooley et A. Wiseloge. 2000. *Biomass Commercialization Prospects in the Next 2 to 5 years : Biomass Bolloquies 2000*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 38 p. En ligne. <<http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28886.pdf>>. Consulté le 25 novembre 2007.
- Hill, Jason. 2007. «Environmental Costs and Benefits of Transportation Biofuel Production from Food- and Lignocellulose-Based Energy Crops. A Review». *Agronomic Sustainable Development*. vol. 27, no 1 (janvier-mars), p. 1-12.
- Hill, Jason, Erik Nelson, David Tilman, Stephen Polasky et Douglas Tiffany. 2006. «Environmental, Economic, and Energetic Costs and Benefits of Biodiesel and Ethanol Biofuels». *Proceedings of the National Academy of Sciences*. vol. 103, no 30 (25 juillet), p. 11206-11210.

- Himmel, Michael E., Shi-You Ding, David K. Johnson, William S. Adney, Mark R. Nimlos, John W. Brady et Thomas D. Foust. 2007. «Biomass Recalcitrance : Engineering Plants and Enzymes for Biofuels Production». *Science*. vol. 315, no 5813 (9 février), p. 804.
- Ho, S. P. 1989. «Global Warming Impact of Ethanol Versus Gasoline». In *Présenté à la conférence nationale (1989) «Clean Air Issues and America's Motor Fuel Business»* (Octobre).
- Hodge, Cal. 2002. «Ethanol Use in US Gasoline Should be Banned, not Expanded». *Oil and Gas Journal*. vol. 100, no 37 (9 septembre), p. 20-28.
- Hodge, Cal. 2003. «Comment : More Evidences Mounts for Banning, not Expanding, Use of Ethanol in US Gasoline». *Oil and Gas Journal*. vol. 101, no 38 (6 octobre) p. 18-20.
- Holtz-Giménez, Eric. 2007. «Les cinq mythes de la transition vers les agrocarburants». *Monde diplomatique*, no 639 (juin), p. 26-27.
- Horrigan, Leo, Robert S. Lawrence et Polly Walker. 2002. «How Sustainable Agriculture Can Address the Environmental and Human Health Harms of Industrial Agriculture». *Environmental health perspectives*. vol. 110, no 5, p. 445-456.
- Hoskinson, Reed L., Douglas L. Karlen, Stuart J. Birrell, Corey W. Radtke et W. W. Wilhelm. 2007. «Engineering, Nutrient Removal, and Feedstock Conversion Evaluations of Four Corn Stover Harvest Scenarios». *Biomass and Bioenergy*. vol. 31, no 2-3 (février-mars), p. 126-136.
- Hu, Wen-Jing, Scott A. Harding, Jihau Lung, Jacqueline L. Popko, John Ralph, Douglas D. Stokke, Chung-Jui Tsai et Vincent L. Chiang. 1999. «Repression of Lignin Biosynthesis Promotes Cellulose Accumulation and Growth in Transgenic Trees». *Nature biotechnology*. vol. 17, no 8 (août), p. 808-812.
- ISAAA. 2007. *État mondial des plantes biotechnologiques/GM commercialisées. 2007: International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications, Brief 37-2007, Résumé, 15 p. En ligne.*
<<http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/37/executivesummary/pdf/Brief%2037%20-%20Executive%20Summary%20-%20French.pdf>>. Consulté le 25 février 2008.
- Jacobson, Mark Z. 2007. «Effects of Ethanol (E85) Versus Gasoline Vehicules on Cancer and Mortality in the United States». *Environmental science and technology*. vol. 41, no 11 (1^{er} juin), p. 4150-4157.
- Johnson, Jane M.-F., Mark D. Coleman, Russ Gesch, Abdullah Jaradat, Rob Mitchell, Don Reicosky et W. W. Wilhelm. 2007. «Biomass-Bioenergy Crops in the United States : A Changing Paradigm». *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*. vol. 1, no 1, p. 1-28.
- Kadam, Kiran L., et James D. McMillan. 2003. «Availability of Corn Stover as a Sustainable Feedstock for Bioethanol Production». *Bioresource Technology*. vol. 88, no 1 (mai), p. 17-25.
- Karsenti, Thierry, et Stéphanie Dermers. 2000. «L'étude de cas». In *Introduction à la recherche en éducation*, Thierry Karsenti et Lorraine Savoie-Zajc, p. 225-308. Sherbrooke: Éditions du CPR.

- Kartha, Sivan. 2006. «Environmental Effects of Bioenergy». In *2020 Focus 14: Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges*, Peter Hazell and R. K. Pachauri. En ligne. <http://www.ifpri.org/2020/focus/focus14/focus14_04.pdf>. Consulté le 15 novembre 2007.
- Kaspar, T. C., Donald C. Erbach et R. M. Cruse. 1990. «Corn Response to Seed-Row Residue Removal». *Soil Science Society of America Journal*. vol. 54, no 4 (juillet-août), p. 1112-1117.
- Keeney, D. R., et Thomas H. Deluca. 1992. «Biomass as an Energy Source for the Midwestern US». *American Journal of Alternative Agriculture*. vol. 7, p. 137-143.
- Kerr, Richard A., et Robert F. Service. 2005. «What can Replace Cheap Oil - and When?». *Science*. vol. 309, no 5731 (1^{er} juillet), p. 101.
- Khan, S. A, R. L. Mulvaney, T. R. Ellsworth et C. W. Boast. 2007. «The Myth of Nitrogen Fertilization for Soil Carbon Sequestration». *Journal of Environmental Quality*. vol. 36, no 6 (novembre-décembre), p. 1821-1832.
- Kim, Seungdo, et Bruce E. Dale. 2002. «Allocation Procedure in Ethanol Production System from Corn Grain : I. System Expansion». *International Journal of Life Cycle Assessment*. vol. 7, no 4, p. 237-243.
- Kim, Seungdo, et Bruce E. Dale. 2004. «Global Potential Bioethanol Production from Wasted Crops and Crop Residues». *Biomass and Bioenergy*. vol. 26, no 4 (avril), p. 361-375.
- Kim, Seungdo, et Bruce E. Dale. 2005a. «Environmental Aspects of Ethanol Derived from NoTilled Corn Grain : Nonrenewable Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions». *Biomass and Bioenergy*. vol. 28, no 5 (mai), p. 475-489.
- Kim, Seungdo, et Bruce E. Dale. 2005b. «Life Cycle Assessment of Various Cropping Systems Utilized for Producing Biofuels : Bioethanol and Biodiesel». *Biomass and Bioenergy*. vol. 29, no 6 (décembre), p. 426-439.
- Kim, Seungdo, et Bruce E. Dale. 2008. «Life Cycle Assessment of Fuel Ethanol Derived from Corn Grain via Dry Milling». *Bioresource Technology*. vol. 99, no 12 (août), p. 5250-5260.
- Kintisch, Eli. 2006. «Biofuels to be Focus of New DOE Centers». *Science*. vol. 313, no 5788 (11 août), p. 746.
- Kintisch, Eli. 2007. «How to Make Biofuels Truly Poplar». *Science*. vol. 315, no 5813 (9 février), p. 786.
- Koonin, Steven E. 2006. «Getting Serious about Biofuels». *Science*. vol. 311, no 5760 (27 janvier), p. 435.
- Kovarik, Bill. 1998. «Henry Ford, Charles Kettering and the "Fuel of the Future"». *Automotive History Review*, no 32. p. 7-27. En ligne. <<http://www.radford.edu/~wkovarik/papers/fuel.html>>. Consulté le 25 novembre 2007.
- Labrecque, Michel. et Traian I. Teodorescu. 2005. «Field Performance and Biomass Production of 12 Willow and Poplar Clones in Short-Rotation Coppice in Southern Quebec (Canada)». *Biomass and Bioenergy*. vol. 29, no 1 (juillet). p. 1-9.

- Lacombe, Réjean. 1994. «Un mélange de gazoline et d'éthanol. Sonic devient la première à offrir de «l'essence verte»». *Le Soleil* (Québec), mercredi le 7 septembre, p. B9.
- Lafrance, Gaëtan. 2007. *Vivre après le pétrole : mission possible?* Québec: Éditions Multimondes, 431 p.
- Lal, Rattan. 2005. «World Crop Residues Production and Implications of its Use as a Biofuel». *Environment International*. vol. 31, no 4 (mai), p. 575-584.
- Latouche, Serge. 2001. «Nature, écologie, économie. Une approche anti-utilitariste». *La Revue du MAUSS semestrielle*, no 17, p. 57-70.
- Lavigne, Amanda, et Susan E. Powers. 2007. «Evaluating Fuel Ethanol Feedstocks from Energy Policy Perspectives : A Comparative Energy Assessment of Corn and Corn Stover». *Energy Policy*. vol. 35, no 11 (novembre), p. 5918-5930.
- Le Curieux-Belfond, Olivier, Louise Vandelac, J. Caron et Gille-Éric Séralini. 2008. «Factors to Consider Before Authorizing Commercialization of Aquatic Genetic Modified Organisms: The Case of Transgenic Salmon». *Environmental Science & Policy*. 16 p. [en cours de publication].
- Leibtag, Ephraim. 2008. «Corn Prices Near Record High, But What About Food Costs?». *Amber Waves. The Economics of Food, Farming, Natural Resources, and Rural America*. United States Department of Agriculture. Economic Research Service. En ligne. <<http://www.ers.usda.gov/AmberWaves/February08/Features/CornPrices.htm>>. Dernière modification le *Février 2008*. Consulté le 20 avril 2008.
- Lemarchand, Fabienne. 2007. «Les biocarburants ne sont pas si verts». *Recherche*, no 408 (mai), p. 54-57.
- Lemire, Mélanie. 2008. «L'éthanol à base de maïs et de canne à sucre : Le impacts sur l'environnement et la santé humaine de ces agrocarburants de première génération». Rapport de synthèse environnementales présenté comme exigence partielle du doctorat en sciences de l'environnement. Communication personnelle, Montréal, Université du Québec à Montréal, 86 p.
- Lewandowska, I., J.C. Clifton-Brown, J.M.O. Scurlock et W. Huisman. 2000. «Miscanthus : European Experience with a Novel Energy Crop». *Biomass and Bioenergy*. vol. 19, no 4 (octobre), p. 209-217.
- Linden, D. R., C. E. Clapp et R. H. Dowdy. 2000. «Long-Term Corn Grain and Stover Yields as a Function of Tillage and Residue Removal in East Central Minnesota». *Soil and Tillage Research*. vol. 56, no 3-4 (août), p. 167-174.
- Lorenz, David, et David Morris. 1995. «How Much Energy Does it Take to Make a Gallon of Ethanol?». Institute for Local Self-Reliance, National Office. En ligne. <http://www.carbohydrateconomy.org/library/admin/uploadedfiles/How_Much_Energy_Does_it_Take_to_Make_a_Gallon_.html>. Dernière modification le *Août 1995*. Consulté le 26 janvier 2008.

- Lynd, Lee R., Janet H. Cushman, Roberta J. Nichols et Charles E. Wyman. 1991. «Fuel Ethanol from Cellulosic Biomass». *Science*. vol. 251, no 4999 (15 mars), p. 1318-1323.
- Mann, Linda, Virginia Tolbert et Janet Cushman. 2002. «Potential Environmental Effects of Corn (*Zea mays L.*) Stover Removal with Emphasis on Soil Organic Matter and Erosion». *Agriculture, Ecosystems and Environment*. vol. 89, no 3 (mai), p. 149-166.
- Marland, G., et Anthony F. Turhollow. 1991. «CO₂ Emissions from the Production and Combustion of Fuel Ethanol from Corn». *Energy*. vol. 16, no 11-12, p. 1307-1316.
- Marris, Emma. 2006. «Sugar Cane and Ethanol : Drink the Best and Drive the Rest». *Nature*. vol. 444, no 7120 (7 décembre), p. 670-672.
- McAloon, Andrew, Frank Taylor, Winnie Yee, Kelly Ibsen et Robert Wooley. 2000. *Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 35 p. En ligne.
<<http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/28893.pdf>>. Consulté le 24 janvier 2008.
- McLaughlin, S. B., Daniel G. De La Torre Ugarte, C. T. Garten Jr., L. R. Lynd, M. A. Sanderson, Virginia R. Tolbert et D. D. Wolf. 2002. «High-value Renewable Energy from Prairie Grasses». *Environmental science and technology*. vol. 36, no 10 (15 mai), p. 2122-2129.
- McLaughlin, S. B., et M. E. Walsh. 1998. «Evaluating Environmental Consequences of Producing Herbaceous Crops for Bioenergy». *Biomass and Bioenergy*. vol. 14, no 4 (avril), p. 317-324.
- McMillan, James D. 1997. «Bioethanol production : Status and prospects». *Renewable Energy*. vol. 10, no 1-2 (février-mars), p. 295-302.
- McSwiney, Claire P., et Philip Robertson. 2005. «Nonlinear Response of N₂O Flux to Incremental Fertilizer Addition in a Continuous Maize (*Zea mays L.*) Cropping System». *Global Change Biology*. vol. 11, no 10 (octobre), p. 1712-1719.
- Merriam, Sharan B. 1988. *Case Study Research in Education : A Qualitative Approach*. San Francisco: Jossey-Bass, 226 p.
- Mitchell, Donald. 2008. *A note on Rising Food Prices*: The World Bank, Development Prospects Group, Policy Research Working Paper 4682, 20 p. p.
- Monbiot, George. 2006. «Biocarburants : attention, danger!». *Courrier international*, no 797 (9 février), p. 52.
- Munoz, I., et N. Roses. 2000. «Comparison of extraction methods for the determination of atrazine accumulation in freshwater molluscs (*Physa acuta* Drap. and *Ancylus fluviatilis* Müll, Gastropoda)». *Water Research*. vol. 34 no 10, p. 2846-2848.
- NAS. 2003. *Frontiers in Agricultural Research : Food, Health, Environment, and Communities*. Washington, DC: The National Academy of Sciences, 268 p. En ligne.
<<http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=0309084946>>. Consulté le 15 novembre 2007.

- NAS. 2008. *Water Implications of Biofuels Production in the United States*. Washington, DC: The National Academy of Sciences, 88 p. En ligne. http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=12039&page=1. Consulté le 25 janvier 2008.
- Naylor, Raymond, Walter Falcon et Erika Zavaleta. 1997. «Variability and Growth in Grain Yields, 1950-94 : Does the Record Point to Greater Instability? ». *Population Development Review*. vol. 23, no 1 (mars), p. 41-58.
- Nealson, Ken, et J. Craig Venter. 2001. *Workshop on The role of Biotechnology in Mitigating Greenhouse Gas Concentrations*: Résumé exécutif préparé par l'U.S. Department of Energy et l'Office of Biological and Environmental Research, 19 p. En ligne. <http://genomicsgtl.energy.gov/warming/GTLBiotechwksp.shtml>. Consulté le 25 novembre 2007.
- Nellemann, Christian, Lera Miles, Bjørn P. Kaltenborn, Melanie Virtue et Hugo Ahlcnus. 2007. *The Last Stand of the Orangutan. State of Emergency : Illegal Logging, Fire and Palm Oil in Indonesia's National Parks*: Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) - UNESCO. En ligne. http://www.unep-wcmc.org/resources/PDFs/LastStand/full_orangutanreport.pdf. Consulté le 18 décembre 2007.
- Niven, Robert K. 2005. «Ethanol in Gasoline : Environmental Impacts and Sustainability Review Article». *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. vol. 9, no 6 (décembre), p. 535-555.
- Normand, François. 2005. «Les pétrolières prennent le leadership des énergies de substitution». *Les Affaires* (Montréal), samedi le 3 septembre, p. 7.
- OCDE. 2007. *Biocarburants pour les transports : politiques et possibilités*: Organisation de coopération et de développement économiques, 8 p. En ligne. <http://www.oecd.org/dataoecd/2/40/39743323.pdf>. Consulté le 25 janvier 2008.
- OCDE/FAO. 2007. *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2007-2016*. Paris: Organisation de Coopération et de Développement Économiques et Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, 95 p. En ligne. http://www.oecd.org/document/0/0,3343,en_2649_37401_38891904_1_1_1_37401,00.html. Consulté le 25 janvier 2008.
- Olar, M., N. Romain et K. Klein. 2004. *Ethanol Industry in Canada*. Coll. «Cahiers du CRÉA (Centre de recherche en économie agroalimentaire), Research Series»: Université Laval, 61 p.
- ONU-Énergie. 2007. *Sustainable Bioenergy : a Framework for Decision Makers*: Organisations des Nations Unies - UN-Energy, 61 p. En ligne. <http://www.fao.org/docrep/010/a1094e/a1094e00.htm>. Consulté le 25 janvier 2008.
- ONU. 2007a. *Rapport du Rapporteur spécial sur le droit à l'alimentation*: Assemblée générale des Nations Unies, 25 p. En ligne. <http://www.aidh.org/alimentation/pdf/AGOnu-07.pdf>. Consulté le 22 janvier 2008.

- ONU. 2007b. «Jean Ziegler qualifie le recours aux biocarburants de 'crime contre l'humanité'». *Centre de Nouvelles ONU*, 26 octobre. En ligne. <<http://www.un.org/apps/newsFr/storyF.asp?NewsID=15101&Cr=Ziegl..>>. Consulté le 5 mars 2008.
- ONU. 2008. «Crise alimentaire : Jean Ziegler propose un moratoire sur les biocarburants». *Centre de Nouvelles ONU*, 28 avril. En ligne. <<http://www.un.org/apps/newsFr/storyF.asp?NewsID=16425&Cr=Ziegler&Cr1=alimentation>>. Consulté le 28 avril 2008.
- Pacala, S., et R. Socolow. 2004. «Stabilization Wedges : Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies». *Science*. vol. 305, no 5686 (13 août), p. 968-972.
- Palmer, Michael W. 2007. «Biofuels and the Environment». *Science*. vol. 317, no 5840 (17 août), p. 897.
- Parrika, Matti. 2004. «Global Biomass Fuel Resources». *Biomass and Bioenergy*. vol. 27, no 6 (décembre), p. 613-620.
- Patzek, Tad W. 2006a. «A First-Law Thermodynamic Analysis of the Corn-Ethanol Cycle». *Natural Resources Research*. vol. 15, no 4 (décembre), p. 255-270.
- Patzek, Tad W. 2006b. *The Real Biofuel Cycle*. En ligne. <<http://petrolicum.berkeley.edu/patzek/BiofuelQA/Materials/RcalFuelCycles-Web.pdf>>. Consulté le 3 décembre 2007.
- Patzek, Tad W., S.-M. Anti, R. Campos, K. W. Ha, J. Lee, B. Li, J. Padnick et S.-A. Yee. 2005. «Ethanol From Corn : Clean Renewable Fuel for the Future, or Drain on our Resources and Pockets?». *Environment, Development and Sustainability*. vol. 7, no 3 (septembre), p. 319-336.
- Paul, Helena, et Almuth Ernsting. s.d. «Second Generation Biofuels: An Unproven Future Technology with Unknown Risks». En ligne. <http://www.biofuelwatch.org.uk/inf_paper_2g-bfs.pdf>. Consulté le 2 mai 2008.
- PC. 2007. «La production d'éthanol fera monter le prix des aliments». *Le Devoir*, mardi le 23 mars, p. b3.
- Pearce, Fred. 2005. «Forests Paying the Price for Biofuels. (Drive for Green Energy Encouraging Destruction of Tropical Rainforests)». *New Scientist*. vol. 188, no 2526 (19 novembre), p. 19.
- Pedersen, J. F., K. P. Vogel et D. Funnell. 2005. «Impact of Reduced Lignin on Plant Fitness». *Crop Science*. vol. 45, no 3 (mai-juin), p. 812-819.
- Perlack, Robert D., et Anthony F. Turhollow. 2003. «Feedstock Cost Analysis of Corn Stover Residues for Further Processing». *Energy*. vol. 28, no 14 (novembre), p. 1395-1403.
- Perlack, Robert D., Lynn L. Wright, Anthony F. Turhollow, Robin L. Graham, Bryce J. Stokes et Donald C. Erbach. 2005. *Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry : The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply*. Oak Ridge, Tennessee: U.S. Department of Energy et U.S. Department of Agriculture. 59 p.

- Pimentel, David. 1991. «Ethanol Fuels : Energy Security, Economics, and the Environment». *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*. vol. 4, no 1 (mars), p. 1-13.
- Pimentel, David. 2001. «The Limits of Biomass Energy». In *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, M. Robert. New York: Academic Press.
- Pimentel, David. 2003. «Ethanol Fuels : Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts are Negative». *Natural Resources Research*. vol. 12 no 2 (juin), p. 127-134.
- Pimentel, David. 2006. «Soil Erosion : a Food and Environmental Threat». *Environment, Development and Sustainability*. vol. 8, no 1 (février), p. 119-137.
- Pimentel, David, Bonnie Berger, David Filberto, Michelle Newton, Benjamin Wolfe, Elizabeth Karabinakis, Steven Clark, Elaine Poon, Elizabeth Abbett et Sudha Nandagopal. 2004. «Water Resources : Current and Future Issues». *BioScience*. vol. 54 (octobre), no 10, p. 909-918.
- Pimentel, David, C. Harvey, P. Resosudarmo, K. Sinclair, D. Kurz, M. McNair, S. Crist, L. Shpritz, L. Fitton, R. Saffouri et R. Blair. 1995. «Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits». *Science*. vol. 267, no 5201 (24 février), p. 1117-1123.
- Pimentel, David, Megan Herz, Michele Glickstein, Mathiew Zimmermann, Richard Allen, Katrina Becker, Jeff Evans, Benita Hussain, Ryan Sarsfeld, Anat Grosfeld et Thomas Seidel. 2002. «Renewable Energy : Current and Potential Issues». *BioScience*. vol. 52, no 12 (décembre), p. 1111-1120.
- Pimentel, David, et Rattan Lal. 2007. «Biofuels and the Environment». *Science*. vol. 317, no 5840 (17 août), p. 897.
- Pimentel, David, et Tad W. Patzek. 2005. «Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower». *Natural Resources Research*. vol. 14, no 1 (mars), p. 65-76.
- Pimentel, David, et Tad W. Patzek. 2006. «Green Plants, Fossil Fuels, and Now Biofuels». *BioScience*. vol. 56, no 11 (novembre), p. 875.
- Pimentel, David, et Tad W. Patzek. 2007. «Ethanol Production : Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane». *Natural Resources Research*. vol. 16, no 3 (septembre), p. 235-242.
- Pimentel, David, Tad W. Patzek et Gerald Cecil. 2007. «Ethanol Production: Energy, Economic, and Environmental Losses». *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. vol. 189, p. 25-41.
- Pimentel, David, et M. Pimentel. 1996. *Food, Energy, and Society*. Niwot: University Press of Colorado.

- PNUE. 2007a. «Welcome to the UNEP/TNT Toolkit for Clean Fleet Strategy Development. Tool 14: Alternative Fuels». Programme des Nations Unis pour l'environnement - United Nations Environment Programme (UNEP). En ligne. <<http://www.unep.org/tnt-unesp/toolkit/Actions/Tool14/index.html>>. Consulté le 24 octobre.
- PNUE. 2007b. *GEO4 : l'environnement pour le développement*. Danemark: Programme des Nations Unis pour l'environnement - United Nations Environment Programme (UNEP), 540 p. En ligne. <http://www.unep.org/geo/geo4/report/GEO-4_Report_Full_FR.pdf>. Consulté le 25 janvier 2008.
- Podersimo, L. O., B. R. Hames, Shahab Sokhansanj et W. C Edens. 2005. «Variation in Corn Stover Composition and Energy Content with Crop Maturity». *Biomass and Bioenergy*. vol. 28, no 4 (avril), p. 366-374.
- Pollack, Andrew. 2006. «Du maïs haute performance pour l'éthanol». *La Presse* (Montréal), mardi le 24 octobre, p. 6.
- Power, J. F., P. T. Koemer, J. W. Doran et W. W. Wilhelm. 1998. «Residual Effects of Crop Residues on Grain Production and Selected Soil Properties». *Soil Science Society of America Journal*. vol. 62, no 5 (septembre), p. 1393-1397.
- Prieur-Vernat, Anne, et Stéphane His. 2007. «Les biocarburants dans le monde». *PANORAMA 2007. Les brochures de l'IFP*, p. 6. En ligne. <<http://www.ifp.fr/information-publications/brochures>>. Consulté le 30 mai 2008.
- Québec, ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs. 2008. *Bilan de la deuxième année de mise en oeuvre du plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques. 2007-2008 : Une année charnière dans la mise en oeuvre du plan d'action*: Gouvernement du Québec, 24 p. En ligne. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/bilan2.pdf>. Consulté le 26 juin 2008.
- Québec, site du premier ministre. 2007. «Près de 25 millions de dollars d'investissements dans la recherche sur l'éthanol cellulosique en Estrie». Gouvernement du Québec. En ligne. <<http://www.premier-ministre.gouv.qc.ca/salle-de-presse/communiqués/2007/juin/2007-06-07.shtml>>. Dernière modification le 7 juin 2007. Consulté le 3 septembre 2007.
- Québec, Société générale de financement 2000. «La SGF s'associe à un projet de 100 millions de dollars pour la construction d'une usine d'éthanol à Varennes». En ligne. <<http://www.sgfqc.com/fr/centre-documentation/presse/communiqués/0000communiqués-archives/2000/20001030.htm>>. Consulté le 7 février 2008.
- Radio-Canada. 2007. «Biocarburant : Les revers de l'éthanol». En ligne. <<http://www.radio-canada.ca/nouvelles/environnement/2007/11/07/001-Mais-Ethanol-Enquete.shtml>>. Dernière modification le 7 novembre 2007. Consulté le 9 novembre 2007.
- Ragauskas, Arthur J., Charlotte K. Williams, Brian H. Davison, George Britovsek, John Cairney, Charles A. Eckert, William J. Frederick, Jr., Jason P. Hallett, David J. Leak, Charles L. Liotta, Jonathan R. Mielenz, Richard Murphy, Richard Templar et Timothy Tschaplinski. 2006. «The Path Forward for Biofuels and Biomaterials». *Science*. vol. 311, no 5760 (27 janvier), p. 484-489.

- Raghu, S., R. C. Anderson, C. C. Daehler, A. S. Davis, H. N. Wiedenmann, D. Simberloff et R. N. Mack. 2006. «Adding Biofuels to the Invasive Species Fire?». *Science*. vol. 313, no 5794 (22 septembre), p. 1742.
- Rask, Kevin N. 1998. «Clean Air and Renewable Fuels : the Market for Fuel Ethanol in the US from 1984 to 1993». *Energy Economics*. vol. 20, no 3 (juin), p. 325-345.
- Reilly, J., F. Tubiello, B. McCarl, D. Abler, R. Darwin, K. Fuglie, S. Hollinger, C. Izaurralde, S. Jagtap, J. Jones, L. Mearns, D. Ojima, E. Paul, K. Paustian, S. Riha, N. Rosenberg et C. Rosenzweig. 2003. «US Agriculture and Climate Change : New Results». *Climate Change*. vol. 57, no 1-2 (mars), p. 43-69.
- RFA. 2005. *Homegrown for the Homeland : Ethanol Industry Outlook 2005*: Renewable Fuels Associations. En ligne. <www.ethanolrfa.org/resource/outlook/>. Consulté le 19 octobre 2007.
- RFA. 2007. *Ethanol Industry Outlook 2007. Building New Horizon*. Washington: Renewable Fuels Association, 19 p. En ligne. <http://www.ethanolrfa.org/objects/pdf/outlook/RFA_Outlook_2007.pdf>. Consulté le 19 janvier 2008.
- RFA. 2008a. *Changing the Climate. Ethanol Industry Outlook 2008*: Renewable Fuel Association, 20 p. En ligne. <http://www.ethanolrfa.org/objects/pdf/outlook/RFA_Outlook_2008.pdf>. Consulté le 17 avril 2008.
- RFA. 2008b. «Renewable Fuels Association». En ligne. <<http://www.ethanolrfa.org>>. Consulté le 15 août 2008.
- RFA. 2009a. *Ethanol Industry Outlook. Growing innovation : America's energy future starts at home*: Renewable Fuel Association, 33 p. En ligne. <http://www.ethanolrfa.org/objects/pdf/outlook/RFA_Outlook_2009.pdf>.
- RFA. 2009b. «Industry Statistics». Renewable Fuels Association. En ligne. <<http://www.ethanolrfa.org/industry/statistics/>>. Dernière modification le juin 2008. Consulté le 1^{er} avril 2009.
- Richard, S., S. Moslemi, H. Sipahutar, N. Benachour et E.G. Seralini. 2005. «Differential effects of glyphosate and roundup on human placental cells and aromatase». *Environmental health perspectives*. vol. 113, no 6, p. 716-720.
- Ricklefs, Robert E. 1996. *Ecology*. New York: Freeman, 896 p.
- Rieger, M. A., M. Lamond, C. Preston, S. B. Powles et R. T. Roush. 2002. «Pollen-Mediated Movement of Herbicide Resistance Between Commercial Canola Fields». *Science*. vol. 296, no 5577 (28 juin), p. 2386-2388.
- Righelato, Renton, et Dominick V. Spracklen. 2007. «Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests?». *Science*. vol. 317. no 5840 (17 août). p. 902.

- Robin, Marie-Monique. 2008. *Le monde selon Monsanto : de la dioxine aux OGM, une multinationale qui vous veut du bien*. Montréal: éd. Internationale Alain Stanké, 377 p.
- Robson, Colin. 2002. *Real World Research*, 2e édition. Oxford Blackwell Publishers, 599 p.
- Rosegrant, Mark W., Siwa Msangi, Timothy Sulser et Rowena Valmonte-Santos. 2006. «Biofuels and the Global Food Balance». In *2020 Focus 14: Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges*, Peter Hazell and R. K. Pachauri. En ligne. <http://www.ifpri.org/2020/focus/focus14/focus14_03.pdf>. Consulté le 25 mars 2008.
- Rosi-Marshall, E.J., J.L. Tank, T.V. Royer, M.R. Whiles, M. Evans-White, C. Chambers, N.A. Griffiths, J. Pokelsek et M.L. Stephen. 2007. «Toxins in Transgenic Crop Byproducts May Affect Headwater Stream Ecosystems». *Proceedings of the National Academy of Sciences*. vol. 104, no 41 (9 octobre), p. 16204-16208.
- Ross, Nicola. 2007. «Economic Cornfusion». *Alternatives Journal* (Waterloo), p. 7.
- Runge, C. Ford, et Benjamin Senauer. 2007. «How Biofuels Could Starve the Poor». *Foreign Affairs*. vol. 86, no 3 (mai-juin), p. 41.
- Russo, J., et L. Lagadic. 2004. «Effect of environmental concentrations of atrazine on hemocyte density and phagocytic activity in the pond snail *Lymnaea stagnalis* (Gastropoda, Pulmonata)». *Environmental Pollution*. vol. 127, p. 303-311.
- Sabourin, Paul. 2004. «L'analyse de contenu». In *Recherche sociale. De la problématique à la collecte des données*. Benoit Gauthier, p. 357-385. Sainte-Foy (Québec): Presses de l'Université du Québec.
- Salomon, Jean-Jacques. 2003. «Figures de la science sur le champ de bataille. Le scientifique et le guerrier». *Le Banquet*. vol. 18.
- Sanborn, Margaret, Donald Cole, Kathleen Kerr, Cathy Vakil, Luz Helena Sanin et Kate Bassil. 2004. *Pesticides Literature Review*. Toronto: Ontario College of Family Physicians, 186 p. En ligne. <<http://www.cfpc.ca/local/files/Communications/Current%20Issues/Pesticides/Final%20Page%202023APR2004.pdf>>. Consulté le 15 août 2008.
- Sanders, Robert. 2006. «Ethanol Can Replace Gasoline with Significant Energy Savings, Comparable Impact on Greenhouse Gases». *UC Berkeley Press Release*, no 26 janvier. En ligne. <http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2006/01/26_ethanol.shtml>. Dernière modification le 26 janvier 2006
- Sanderson, Katharine. 2006. «US Biofuels : A Field in Ferment». *Nature*. vol. 444, no 7120 (7 décembre), p. 673-676.
- Sauvé, Lucie. 2007. «L'équivoque du développement durable». *Chemin de Traverse*, no 4, p. 31-47.
- Scharlemann, Jörn P. W., et William F. Laurance. 2008. «How Green Are Biofuels?». *Science*. vol. 319, no 5859 (4 janvier), p. 43-44.

- Schneider, Uwe A., et Bruce A. McCarl. 2003. «Economic Potential of Biomass Based Fuels for Greenhouse Gas Emission Mitigation». *Environmental and Resource Economics*. vol. 24, no 4 (avril), p. 291-312.
- Schnoor, Jerald L. 2007. «Ethanol and Water Use». *Environmental science and technology online*. vol. 41, no 19 (1^{er} octobre) p. 6633. En ligne. <<http://pubs.acs.org/subscribe/journals/esthag-w/2007/oct/policy/100107comment.html>>. Consulté le 10 décembre 2007.
- Searchinger, Timothy, Ralph Heimlich, R. A. Houghton, Fengxia Dong, Amani Elobeid, Jacinto Fabiosa, Simla Tokgoz, Dermot Hayes et Tun-Hsiang Yu. 2008. «Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change». *Science*. vol. 319, no 5867 (29 février), p. 1238-1240.
- Séralini, Gilles-Éric. 2005. *Génétiquement incorrect*. Paris: Flammarion, 325 p.
- Service, Robert F. 2007. «Biofuel Researchers Prepare to Reap a New Harvest». *Science*. vol. 315, no 5818 (16 mars), p. 1488-1491.
- Shapouri, Hosein, James A. Duffield et M. Graboski. 1995. *Estimating the Net Energy Balance of Corn Ethanol*. Coll. «Agricultural Economic Report No. 721». Washington, D.C.: US Department of Agriculture, Economic Research Service, Office of Energy and New Uses.
- Shapouri, Hosein, James A. Duffield et Michael Wang. 2002. *The Energy Balance of Corn Ethanol : an Update*: Report No. 813. U.S. Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses. Agricultural Economic, 16 p.
- Sheehan, John, Andy Aden, Keith Paustian, Kendrick Killian, John Benner, Marie Walsh et Richard Nelson. 2003. «Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol». *Journal of Industrial Ecology*. vol. 7, no 3-4, p. 117-146.
- Shreeve, Jarnie. 2006. «Redesigning Life to Make Ethanol». *Technology Review*. vol. 109, no 3, p. 66-69.
- Sluiter, A. D., T. K. Hayward, C. K. Jurich, M. M. Newman, D. W. Templeton, M. F. Ruth, K. W. Evans, B. R. Hames et S. R. Thomas. 2000. *Compositional Variability Among Corn Stover Samples*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. En ligne. <<http://www1.eerc.energy.gov/biomass/pdfs/33925.pdf>>. Consulté le 3 novembre 2007.
- Smaliukas, D., R. Noreika et D. Karalius. 2007. «Clonal Selection of Salix L. Taxa Perspective for Biofuel Production, Evaluation of their Dendrometric Characteristics and Accumulation of Biomass in Short Rotation Plantations». *Biologija*. vol. 53, no 2, p. 59-62.
- Sokhansanj, Shahab, Anthony Turhollow, Janet Cushman et John Cundiff. 2002. «Engineering Aspects of Collecting Corn Stover for Bioenergy». *Biomass and Bioenergy*. vol. 23, no 5 (novembre), p. 347-355.
- Solomon, Barry D., Justin R. Barnes et Kathleen E. Halvorsen. 2007. «Grain and Cellulosic Ethanol : History, Economics, and Energy Policy». *Biomass and Bioenergy*. vol. 31, no 6 (juin), p. 416-425.

- Spatari, Sabrina, Yimin Zhang et Heather L. Maclean. 2005. «Life Cycle Assessment of Switchgrass - and Corn Stover-Derived Ethanol-Fueled Automobiles». *Environmental science and technology*. vol. 39, no 24 (15 décembre), p. 9750-9758.
- Stern, Sir Nicholas. 2007. *The Stern Review. The Economics of Climate Change*. Cambridge: University Press, 575 p. En ligne. <http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_Report.cfm>. Consulté le 17 juin 2007.
- Stewart, C. Neal. 2007. «Biofuels and Biocontainment». *Nature biotechnology*. vol. 25, no 3 (mars), p. 283-284.
- Swan, J. B., R. L. Higgs, T. B. Bailey, N. C. Wollenhapt, W. H. Paulson et A. E. Peterson. 1994. «Surface Residue and In-Row Treatment on Long-Term No-Tillage Continuous Corn». *Agronomy Journal*. vol. 86, p. 711-718.
- Swisher, Joel N. 1994. «Forestry and Biomass Energy Projects : Bottom-Up Comparisons of CO₂ Storage and Costs». *Biomass and Bioenergy*. vol. 6, no 5, p. 359-368.
- Tilman, David, Jason Hill et Clarence Lehman. 2007. «Response to Comment on «Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass»». *Science*. vol. 316, no (15 juin), p. 1567c.
- Torney, François, Lorena Moeller, Andréa Scarpa et Kan Wang. 2007. «Genetic Engineering Approaches to Improve Bioethanol Production from Maize». *Current Opinion in Biotechnology*. vol. 18, no 3 (juin), p. 193-199.
- Tremblay, Nicolas. 1997. «Le Québec va-t-il biocarburer à l'éthanol?». *Entreprendre* vol. 10, no 4, p. 50-51.
- Tyner, Wallace E., et Farzad Taheripour. 2007. «Renewable Energy Policy Alternatives for the Future». *American Journal of Agricultural Economics*. vol. 89, no 5 (décembre), p. 1303-1310.
- Tyson, K. Shaine. 1993. *Fuel Cycle Evaluations of Biomass - Ethanol and Reformulated Gasoline*. Washington: U.S. Department of Energy. National Renewable Energy Laboratory, 129 p. En ligne. <<http://devafdc.nrel.gov/pdfs/2380.pdf>>. Consulté le 3 octobre 2007.
- UE. 2003. «Directive 2003/30/CE du parlement Européen et le conseil du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation de biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports». Journal officiel de l'Union européenne. En ligne. <ec.europa.eu/energy/res/legislation/doc/biofuels/fr_final.pdf>. Consulté le 22 octobre 2007.
- Uihlein, Andreas, Simone Ehrenberger et Liselotte Schebek. 2007. «Utilisation Options of Renewable Resources : a Life Cycle Assessment of Selected Products». *Journal of Cleaner Production*. vol. Article sous presse, épreuve corrigé, no Disponible en ligne le 6 août 2007, p. 1-15.

- UNESCO. 2008. «Stefan Uhlenbrook : « Les conséquences des biocarburants sur les ressources en eau pourraient être très néfastes »». *UNESCO.org*, 15 avril. En ligne. <http://portal.unesco.org/fr/ev.php-URL_ID=42258&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html>. Consulté le 17 avril 2008.
- USDA-FAS. 2008. «World Agricultural Production». United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service. En ligne. <<http://www.fas.usda.gov/wap/current/toc.asp>>. Consulté le 5 mai 2008.
- USDA-NASS. 2008. «Quick Stats: Agricultural Statistics Data Base». En ligne. <<http://www.nass.usda.gov/QuickStats/>>. Consulté le 25 janvier 2008.
- USDA. 2005. *Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry : the Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply*. Washington D.C., 60 p. En ligne. <http://feedstockreview.ornl.gov/pdf/billion_ton_vision.pdf>. Consulté le 23 octobre 2007.
- USDA. 2008. «2007 Corn Crop a Record Breaker». *Newsrooms* (Washington, DC), 11 janvier. En ligne. <http://www.nass.usda.gov/Newsroom/2008/01_11_2008.asp>. Consulté le 25 janvier 2008.
- USDOE. 2002. *Vision for Bioenergy & Biobased Products in the United States*. Washington D.C.: U.S. Department of Energy, 11 p. En ligne. <http://www.brdisolutions.com/pdfs/BioVision_03_Web.pdf>. Consulté le 17 novembre 2007.
- USDOE. 2006. *Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol : a Joint Research Agenda*: U.S. Department of Energy Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 206 p. En ligne. <<http://genomicsgtl.energy.gov/biofuels/b2bworkshop.shtml>>. Consulté le 21 octobre 2007.
- USDOE. 2008a. «Biomass Feedstocks». En ligne. <http://www1.eere.energy.gov/biomass/biomass_feedstocks.html>. Dernière modification le 5 mai 2008. Consulté le 20 juillet 2008.
- USDOE. 2008b. «Biomass Programm». En ligne. <<http://www1.eere.energy.gov/biomass/index.htm>>. Dernière modification le 14 avril 2008. Consulté le 20 juillet 2008.
- USGS. 2008. U.S. Geological Survey. En ligne. <<http://www.usgs.gov/>>. Consulté le 28 juillet 2008.
- USSenate. 2007. «S. 1419 : Renewable Fuels, Consumer Protection, and Energy Efficiency Act of 2007 ». En ligne. <<http://www.govtrack.us/congress/billtext.xpd?bill=s110-1419>>. Consulté le 5 janvier 2008.
- Vandelac, Louise, et Simon Beaudoin. 2007. «Transformer le porc en «vache à lait» risque fort de tuer «la poule aux oeufs d'or. Du porc transgénique à la viande de porc sans porc ...». In *Porcherie!*, p. 256-278: Écosociété.
- Varvel, G. E., K. P. Vogel, R. B. Mitchell, R. F. Follett et J. M. Kimble. 2008. «Comparison of Corn and Switchgrass on Marginal Soils for Bioenergy». *Biomass and Bioenergy*. vol. 32, no 1 (janvier), p. 18-21.

- Vermerris, Wilfred, Ana Saballos, Gebisa Ejeta, Nathan S. Mosier, Michael R. Ladisch et Nicholas C. Carpita. 2007. «Molecular Breeding to Enhance Ethanol Production from Corn and Sorghum Stover». *Crop Science*. vol. 47, no 53, p. S142-S153.
- Vogel, K. P., et H. G. Jung. 2001. «Genetic Modification of Herbaceous Plants for Feed and Fuel». *Critical Reviews in Plant Sciences*. vol. 20, no 1, p. 15-49.
- Vogel, Kenneth P. 1996. «Energy Production from Forage (or American Agriculture - Back to the Future». *Journal of Soil and Water Conservation*. vol. 51, no 2 (mars), p. 137.
- von Blottnitz, Harro, et Mary Ann Curran. 2007. «A Review of Assessments Conducted on Bio-Ethanol as a Transportation Fuel from a Net Energy, Greenhouse Gas, and Environmental Life Cycle Perspective». *Journal of Cleaner Production*. vol. 15, no 7, p. 607-619.
- von Braun, Joachim. 2007. *The World Food Situation. New Driving Forces and Required Actions*. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute (IFPRI), 18 p.
- Wald, Matthew L. 2007. «Is Ethanol for *the Long Haul?*». *Scientific American*. vol. 296, no 1 (janvier), p. 42-49.
- Wang, Michael. 2005. «Energy and Greenhouse Gas Emissions Impacts of Fuel Ethanol». *NGCA Renewable Fuels Forum*. En ligne. www.anl.gov/Media_Center/News/2005/NGCA_Ethanol_Mceting_050823.ppt. Consulté le 27 octobre 2007.
- Wang, Michael, Christopher Sarick et May Wu (1999). Fuel-Cycle Fossil Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Fuel Ethanol Produced from US Midwest Corn. Argonne, Illinois Illinois Department of Commerce and Community Affairs, Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research
- Wesseler, Justus. 2007. «Opportunities ("Costs) Matter : A Comment on Pimentel and Patzek "Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower"». *Energy Policy*. vol. 35, no 2 (mars), p. 1414-1416.
- WI. 2006. *Biofuels for Transportation. Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century*. Résumé. Washington, D.C.: Worldwatch Institut, 5 p.
- Wilhelm, W. W., J. M. F. Johnson, J. L. Hatfield, W. B. Voorhees et D. R. Linden. 2004. «Crop and Soil Productivity Response to Corn Residue Removal: A Literature Review». *Agronomy Journal*. vol. 96, no 1 (janvier-février), p. 1-17.
- Wilhelm, W. W., Jane M.-F. Johnson, Douglas L. Karken et David T. Lightled. 2007. «Corn Stover to Sustain Soil Organic Carbon Further Constrains Biomass Supply». *Agronomy Journal*. vol. 99, p. 1665-1667.
- Wirth, Timothy E., C. Boyden Gray et John D. Podesta. 2003. «The Future of Energy Policy». *Foreign Affairs*. vol. 82, no 4 (juillet-août), p. 132.
- Wyman. Charles E. 2001. «Twenty Years of Trials, Tribulations, and Research Progress in Bioethanol Technology». *Applied Biochemistry and Biotechnology*. vol. 91-93, no 1-9 (mars), p. 5-21.

- Wyman, Charles E. 2007. «What Is (and Is Not) Vital to Advancing Cellulosic Ethanol». *Trends in Biotechnology*. vol. 25, no 4, p. 153-157.
- Yemshanov, Denys, et Daniel McKenney. 2008. «Fast-Growing Poplar Plantations as a Bioenergy Supply Source for Canada». *Biomass and Bioenergy*. vol. 32, no 3 (mars), p. 185-197.
- Youngquist, Walter 1999. «The Post-Petroleum Paradigm - and Population». *Population & Environment*. vol. 20, no 4 (mars), p. 297-315.
- Zah, Rainer, Heinz Böni, Marcel Gaush, Roland Hischier, Martin Lehmann et Patrick Wäger. 2007. *Écobilan d'agents énergétiques. Évaluation écologique de biocarburants*. Berne (Suisse): Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et de l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG), 17 p.