

**IMPACT ÉNERGÉTIQUE DES BIOCARBURANTS ET INCIDENCES
SUR L'EFFET DE SERRE : UN CADRE D'ANALYSE**

**Daniel M. KAMMEN^{1,2*}, Alexander E. FARRELL¹,
Richard J. PLEVIN¹, Andrew D. JONES¹,
Gregory F. NEMET^{3,4} et Mark A. DELUCCHI⁵**

¹ Energy & Resources Group
² Goldman School of Public Policy
Université de Californie, BERKELEY

³ Gaylord Nelson Institute of Environmental Studies
⁴ LaFollette School of Public Affairs
Université du Wisconsin à MADISON

⁵ Institute of Transportation Studies
Université de Californie, DAVIS

ÉTATS-UNIS

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	49
1. INTRODUCTION	49
2. LA PRODUCTION DE BIOCARBURANT	52
2.1. Analyse du cycle de vie.....	54
2.2. Limites des méthodes et des instruments d'ACV actuels	55
2.3. Approches analytiques de la modélisation du changement d'affectation des terres	58
3. EFFETS DU CHANGEMENT D'AFFECTION DES TERRES : UN CADRE PRÉLIMINAIRE	62
4. COMPARAISON DES ANALYSES RÉCENTES SUR LES BIOCARBURANTS	65
5. DÉVELOPPEMENT DU MARCHÉ DES BIOCARBURANTS	69
6. LES BÉNÉFICES DE LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT : EXEMPLES D'INITIATIVES PRÉCÉDENTES.....	71
7. CONCLUSION	75
NOTES	77
RÉFÉRENCES	78

Berkeley, Davis, Madison (révisé), septembre 2007

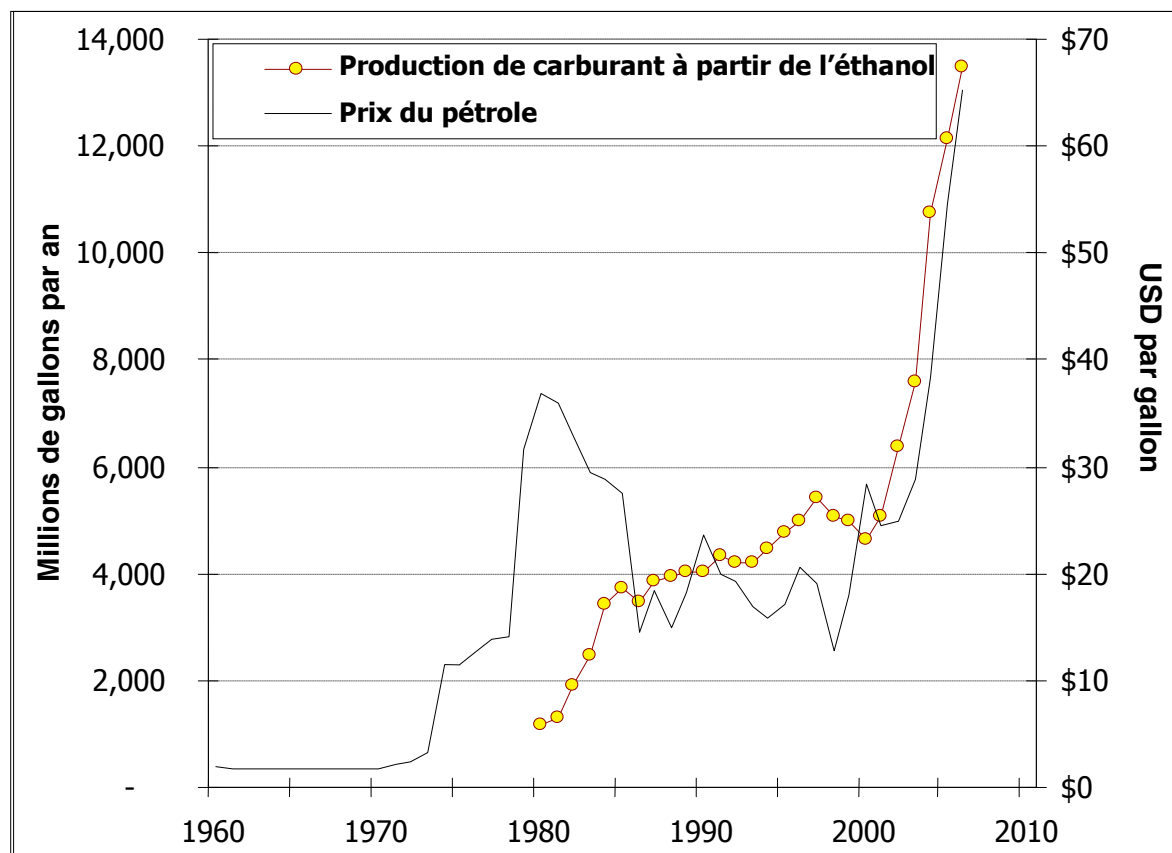
RÉSUMÉ

Ce document présente un examen des questions liées au bilan énergétique classique et à l'impact sur le changement climatique des biocarburants. En ce qui concerne, d'une part, les bilans énergétiques classiques et les bilans des émissions de gaz à effet de serre de la production et de l'utilisation d'une gamme de combustibles et, d'autre part, les questions importantes et de plus en plus controversées liées aux incidences autres que les gaz à effet de serre, notamment sur l'utilisation des terres, les engrais et l'eau, il est à notre avis nécessaire d'améliorer le cadre d'analyse et d'évaluation des biocarburants. Des nouvelles méthodologies et de nouveaux ensembles de données sont en effet indispensables pour examiner les aspects tant physiques que socio-économiques du cycle de vie des biocarburants. Certains composants susceptibles d'être utilisés pour construire cette méthodologie sont présentés en détail et les principaux domaines pour la recherche future sont mis en évidence. Enfin, nous examinons l'historique et les effets potentiels de la création d'une base de ressources pour la recherche sur les biocarburants ainsi que certains impacts sur l'utilisation des terres et sur les aspects socio-économiques des différentes filières de production de matières de base pour les carburants.

1. INTRODUCTION

Le secteur mondial de la production de biocarburants – carburants liquides pour le transport produits à partir de la biomasse et remplaçant les combustibles issus du pétrole – est en progression rapide. La montée en flèche de la production de biocarburants est déterminée par les normes obligatoires imposées par l'État, par la réglementation et les subventions ainsi que par les prix élevés du pétrole. La production de biocarburants est globalement dominée par l'éthanol, le Brésil et les États-Unis assurant chacun un tiers de la production mondiale totale. La production commerciale d'ester méthylique d'huiles végétales (EMHV, souvent identifié simplement sous le nom de biodiesel) n'a commencé qu'après 1990 et vient se placer après la production d'éthanol par ordre de grandeur. La Figure 1 illustre la croissance du secteur des biocarburants modernes, en soulignant son évolution rapide à la suite des chocs pétroliers de 1973 et de 1979 ainsi que les changements spectaculaires qui ont eu lieu lorsque le prix du pétrole a dépassé 25 USD le baril.

Figure 1. Production mondiale d'éthanol et prix du pétrole



Sources : Les prix du pétrole sont issus de BP, 2007 (www.bp.com) ; la production d'éthanol est fournie par la *Renewable Fuels Association* (www.ethanolrfa.org) qui cite l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) comme source des données. En ce qui concerne la production d'éthanol, la série de données chronologiques (1980-2004) n'est pas alignée sur les données relatives aux années plus récentes, qui indiquent des valeurs inférieures pour les années où les chiffres se recoupent. Les chiffres les plus récents sont indiqués ici pour la période 2004-2006.

Les politiques des pouvoirs publics visant à promouvoir les biocarburants s'appuient sur trois motivations communes : 1) fournir un soutien à l'agriculture ; 2) réduire les importations de pétrole ; 3) améliorer la qualité de l'environnement (notamment par la prévention du réchauffement climatique dû aux émissions de dioxyde de carbone). Dans la pratique cependant, les politiques actuelles sur les biocarburants tendent à agir surtout directement comme mécanismes de soutien à l'agriculture, en s'appuyant sur des mesures telles que les normes obligatoires ou l'octroi de subventions sur la consommation de biocarburants. En revanche, les impacts des biocarburants sur l'environnement ne sont souvent pas mesurés, pas plus qu'ils ne sont utilisés pour déterminer les incitations financières ou orienter les pouvoirs publics dans l'élaboration des réglementations. En outre, les matières de base actuellement utilisées pour la production de biocarburants sont des produits agricoles relativement courants (par exemple le maïs et le soja) et les processus actuels de production de biocarburant datent

déjà de plusieurs années. La maximisation du rendement d'un certain nombre de cultures de base implique un apport élevé de carburants fossiles, ce qui vient compliquer davantage la combinaison d'éléments à la base des programmes de soutien à la production de biocarburants. Il est donc peu prudent d'ignorer les effets différentiels des biocarburants sur l'environnement et ce, pour plusieurs raisons.

Premièrement, le secteur des biocarburants est en rapide évolution et se révèle très rentable, surtout à cause des prix mondiaux élevés du pétrole. Des politiques visant à imposer des normes, à subventionner ou à promouvoir sous d'autres formes les biocarburants sont actuellement mises en œuvre, et davantage sont encore proposées. Étant donné les investissements massifs dans la recherche et le capital qui continuent à affluer dans le secteur des biocarburants, le moment est venu de procéder à une évaluation attentive des types et de l'ampleur des mesures incitatives susceptibles d'être employées pour obtenir des performances environnementales élevées. Engager ce processus d'analyse permet de récompenser les efforts en faveur des biocarburants renouvelables et d'éviter le risque, bien réel, de voir l'économie grevée de coûts résultant des engagements pris au titre de précédents investissements peu clairvoyants.

Deuxièmement, les biocarburants sont actuellement proposés, et souvent présentés, comme une solution aux problèmes environnementaux, notamment le changement climatique. Cependant, suivant la façon dont ils sont produits ou cultivés, transformés et ensuite utilisés, les biocarburants peuvent avoir un impact environnemental positif ou négatif par rapport à l'essence (Farrell *et al.* 2006). Par exemple, l'éthanol extrait du maïs, s'il est distillé dans une installation alimentée au charbon bois, peut être responsable d'émissions de gaz à effet de serre plus nocives que celles de l'essence (sauf si l'usine au charbon produit des émissions non négligeables d'oxydes de soufre (SO_x), qui ont un effet refroidissant considérable), tandis que l'éthanol cellulosique obtenu en utilisant la fraction non fermentescible de la lignine pour produire la chaleur de procédé ou, mieux encore, produit dans des distilleries alimentées à l'énergie solaire ou éolienne, peut se révéler nettement supérieur à l'essence (sauf si les matières de base de la biomasse finissent par remplacer les zones humides et les forêts tropicales) (Tuner, Plevin *et al.*, 2007). Afin d'opérer une distinction entre ces différents cas et la pléthore d'autres filières de production de matières de base pour les carburants, des normes claires, des principes directeurs et des modèles sont indispensables.

Troisièmement, nombre de nouveaux combustibles, de matières de base et de technologies de transformation sont en train de naître et une multitude d'autres sont à l'étude ou font l'objet de recherches actives (voir par exemple Lotero, Liu *et al.* 2005 ; Kalogo, Habibi *et al.* 2006 ; Kilman 2006 ; Lewandowski et Schmidt 2006 ; Mohan, Pittman *et al.* 2006 ; Tilman, Hill *et al.* 2006 ; Demirbas 2007 ; Gray 2007 ; Stephanopoulos 2007). Ces technologies sont développées comme des technologies de biocarburants proprement dites : il ne s'agit pas de simples adaptations de méthodes de production agricole préexistantes. S'il est possible de gérer ces innovations afin d'obtenir une productivité élevée tout en minimisant les impacts sociaux et environnementaux négatifs, la prochaine génération de biocarburants pourrait être débarrassée des inconvénients que présentent de nombreux biocarburants actuels (par exemple la faible densité énergétique, la corrosion, les performances médiocres à basse température, etc.). Un ensemble de données transparent décrivant les résultats attendus des biocarburants ainsi que des instruments d'analyse accessibles pour évaluer les différents combustibles et filières de production sont essentiels, si l'on entend proposer des mesures incitatives appropriées pour la commercialisation de combustibles plus propres.

Ce document passe en revue certaines questions fondamentales liées au bilan énergétique et à l'impact sur le changement climatique des biocarburants. Nous en déduisons qu'il est nécessaire de disposer d'un cadre amélioré pour l'analyse et l'évaluation des biocarburants et nous présentons en détail certains éléments susceptibles d'être utilisés pour élaborer cette méthodologie. Il est important

d'observer à ce stade comment l'incidence des biocarburants sur l'utilisation des terres peut être mesurée et utilisée dans le processus décisionnel. Enfin, nous examinons et récapitulons l'historique et les répercussions potentielles de la recherche sur les biocarburants.

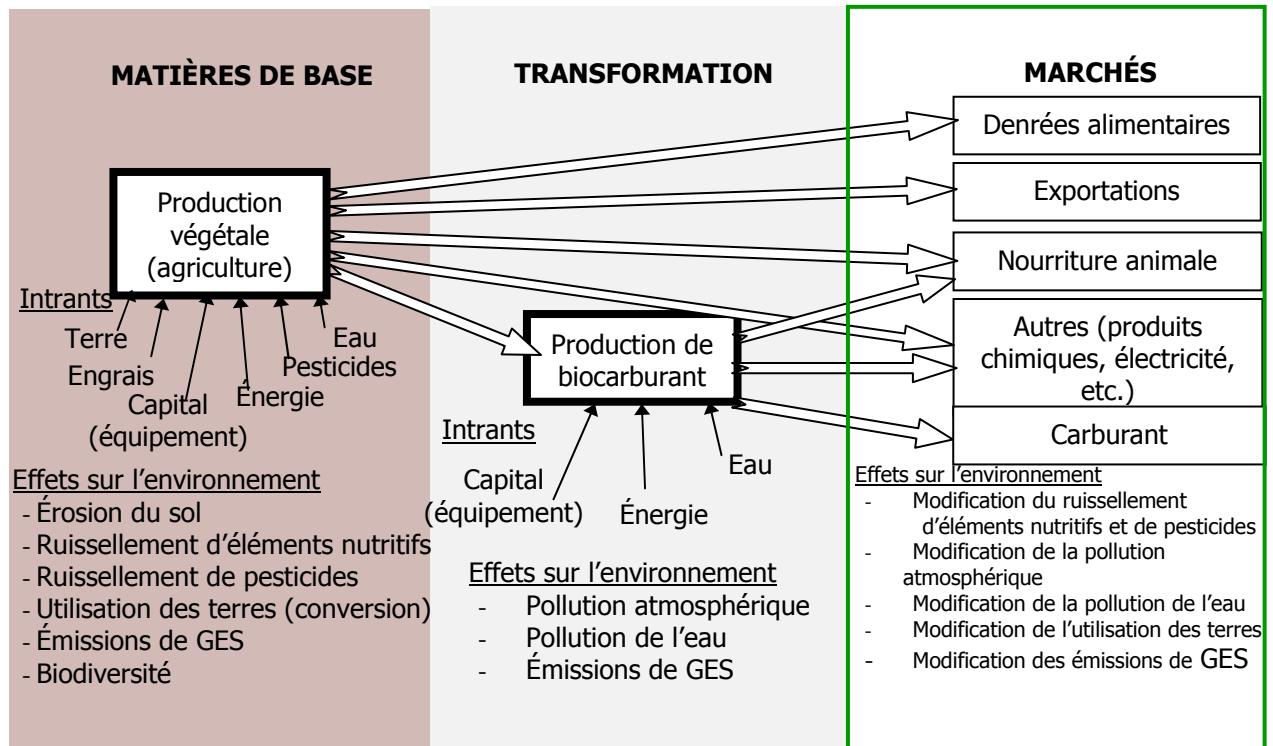
2. LA PRODUCTION DE BIOCARBURANT

Les biocarburants sont produits suivant deux étapes distinctes : la production (ou récolte) de matières de base et la transformation (parfois appelée conversion ou bioraffinage). La Figure 2 présente la production de biocarburant dans l'ensemble du système de production agricole et décrit les principaux intrants et les problèmes environnementaux relatifs à chaque étape. Il est utile d'envisager des « filières de production » de biocarburant comprenant la production de matières de base ainsi que la transformation de ces matières de base en carburant. Il convient de noter que ces données n'incluent pas les mesures de la durabilité du processus de production.

La partie gauche de la Figure 2 illustre la phase de production des matières de base, qui comprend la production végétale, l'agronomie et la transformation. La colonne centrale illustre la transformation, représentée comme une bioraffinerie. La partie droite présente certains marchés importants sur lesquels sont vendus les biocarburants et leurs co-produits. La production de biocarburant donne généralement un ou plusieurs co-produits ou peut devenir parfois le co-produit d'un autre processus de valeur supérieure. Par exemple, la nourriture pour animaux est le principal co-produit de l'éthanol issu du maïs, tandis que le biodiesel (EMHV) est souvent considéré comme un co-produit issu du processus de production des tourteaux de soja, de plus grande valeur. La production d'éthanol à partir de la canne à sucre produit la bagasse (résidu végétal fibreux), qui peut être brûlée pour produire de la chaleur ou de l'électricité. La plupart des marchés sur lesquels les biocarburants et leurs co-produits sont vendus comportent des échanges internationaux intenses.

La Figure 2 illustre le concept fondamental selon lequel la production de biocarburant touche de nombreux marchés différents, y compris les marchés des intrants (par exemple le sol et l'eau) et les marchés des produits agricoles et des co-produits des biocarburants (par exemple les denrées alimentaires et les aliments pour animaux). Il y a lieu de noter que certains de ces intrants peuvent être de nature indirecte plutôt que directe et agir par le biais des interactions entre les marchés. Il est essentiel en outre de remarquer – et de tenir compte de cet aspect dans les analyses sur les biocarburants – que les effets indirects de la production de biocarburant, notamment la destruction de l'habitat naturel pour l'expansion des terres agricoles (par exemple les forêts tropicales humides, la savane ou, dans certains cas, l'exploitation de terres « marginales » utilisées activement, même avec une productivité réduite, par un ensemble de communautés souvent composées de ménages et d'individus pauvres) peuvent avoir un impact environnemental plus important que les effets directs. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) produites indirectement par les biocarburants issus de terres productives qui auraient pu contribuer à la production de denrées alimentaires peuvent se révéler supérieures aux émissions correspondant à une quantité équivalente de combustibles fossiles (Delucchi, 2006; Farrell *et al.*, 2006). Par conséquent, les effets indirects remettent en question toutes les filières actuelles de production de biocarburant ainsi que de nombreuses autres en cours de mise au point. Il est essentiel de se pencher sur ces problèmes si les biocarburants sont appelés à devenir un élément significatif au sein des systèmes énergétiques et socio-économiques (Kammen, 2007).

Figure 2. Filière générale de production des biocarburants (simplifiée) avec intrants et effets sur l'environnement



La production et l'utilisation de biocarburants entraînent, non seulement des effets sur l'environnement, comme l'érosion du sol et les émissions de GES, mais *modifient* aussi certains impacts environnementaux en se substituant, sur les marchés des carburants et les autres marchés, à des produits qui ont eux-mêmes une incidence sur l'environnement. La mesure dans laquelle les co-produits de la production de biocarburants se substituent à d'autres produits ainsi que leurs effets sur l'environnement (au lieu de stimuler une consommation supplémentaire) dépendent de l'élasticité de la demande sur les marchés pertinents (plus la demande est inélastique, plus la substitution est importante), de la façon dont les co-produits influent sur les courbes de l'offre ainsi que des autres facteurs liés ou non au marché (par exemple les facteurs de nature politique et réglementaire).

Ces interactions entre les marchés varient énormément selon le carburant et le mode de production, de sorte que toute tentative visant à présenter un ensemble exhaustif des filières de production de biocarburant et des marchés qui leur sont associés deviendrait rapidement exagérée. Cela est surtout vrai parce que différentes filières de production impliquent souvent un phénomène de concurrence et de substitution entre intrants et co-produits. Il est essentiel d'établir clairement les intrants et les extrants relatifs à tout mode de production de biocarburant de ce type pour pouvoir procéder à l'évaluation précise d'un carburant donné (Farrell *et al.*, 2006). À l'heure actuelle, les filières de production de biocarburants qui représentent le volume le plus important concernent l'éthanol tiré de la canne à sucre, l'éthanol extrait du maïs, le biodiesel extrait du soja, du colza et de l'huile de palme (ces trois derniers éléments étant regroupés au sein de la catégorie des EMHV). Pour ces modes de production, les marchés principaux sont ceux de l'électricité et de la nourriture pour animaux, car il s'agit de ceux où les co-produits tendent à être vendus.

2.1. Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une technique employée pour évaluer l'impact énergétique des biocarburants et les effets sur le réchauffement climatique de la planète. En fait, l'utilisation des techniques d'ACV représente à la fois une méthode et un cadre stratégique pour l'évaluation des biocarburants. Elle permet de comparer ce qui est comparable, notamment :

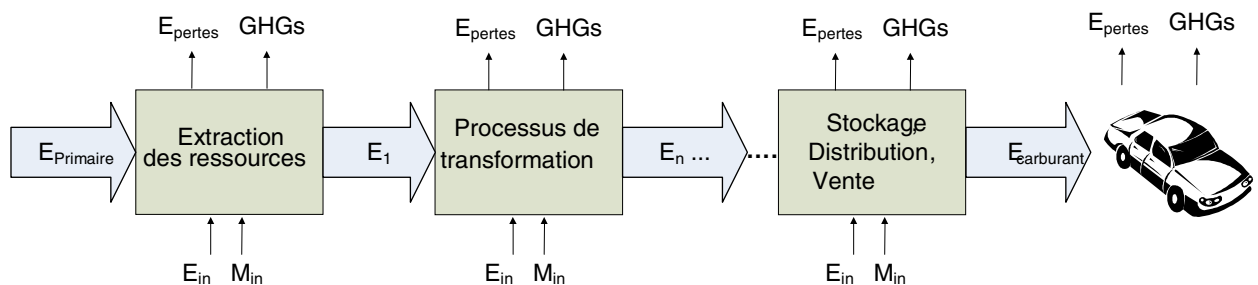
- 1) l'évolution nette de l'offre énergétique mondiale depuis l'utilisation accrue des biocarburants à partir d'une période donnée ;
- 2) la quantité d'émissions de GES dans le monde, imputable à une unité de biocarburant produite.

Du point de vue théorique, un cycle de vie comprend l'ensemble des processus physiques et économiques intéressant directement ou indirectement la vie du produit, depuis la récupération des matières premières utilisées pour fabriquer certaines parties du produit jusqu'au recyclage du produit en fin de vie. Dans la pratique cependant, le cycle de vie étudié par la plupart des instruments d'ACV comprend la production du carburant ainsi que sa combustion mais, en général, il n'englobe pas les effets indirects ou les prend en compte de manière inappropriée (Delucchi 2004).

L'élément de base de l'ACV est un ensemble d'intrants énergétiques et matériels associés à un produit qui présente un intérêt particulier pour une phase spécifique du cycle de vie, avec des facteurs d'émissions associés à certains intrants (Hendrickson *et al.*, 2006). Le cycle de vie constitue donc une combinaison particulière d'éléments de base reliés les uns aux autres, où le produit d'un élément (ou phase) représente un intrant dans une autre phase et où le produit de la dernière phase est le produit ou la quantité étudiée. L'ACV regroupe les émissions liées aux intrants sur l'ensemble des périodes liées les unes aux autres, afin de produire une estimation des émissions totales par unité de produit final tout au long de son cycle de vie (Jones *et al.*, 2007).

Prenons par exemple la représentation simplifiée du cycle de vie du carburant illustrée à la Figure 3. Le cycle de vie du carburant commence par l'extraction des ressources (par exemple la production et le transport du pétrole brut) et se poursuit avec le processus de transformation de la ressource en carburant (par exemple le raffinage du pétrole) puis le stockage, la distribution et la vente. L'utilisation du carburant dans la combustion de l'essence est l'étape finale. Ces étapes s'articulent de façon linéaire comme un diagramme de procédé.

Figure 3. Analyses du cycle de vie classiques excluant les effets indirects



Chaque processus illustré à la Figure 3 requiert des intrants énergétiques et matériels (E_{in} et M_{in}), présente des pertes d'énergie dues aux efficacités de transformation (E_{pertes}) et produit des émissions de gaz à effet de serre (GES). Les ACV actuelles, bien que parfois relativement complexes, suivent *grosso modo* cette approche. Quelques exemples de cette approche sont fournis par les modèles de feuilles de calcul GREET, LEM et GHGenius, qui s'appuie sur une version préliminaire du modèle d'analyse du cycle de vie des émissions « *Lifecycle Emissions Model* » (LEM). Ces modèles sont disponibles et peuvent être téléchargés aux adresses suivantes :

GREET: <http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/>

LEM: <http://www.its.ucdavis.edu/people/faculty/delucchi/index.php#LifecycleEmissions>

GHGenius: http://www.nrcan.gc.ca/es/etb/ctfca/PDFs/GHGenius/gh_genius_pamphlet0405_e.html

Ces modèles d'ACV de première génération permettent de calculer les effets des combustibles sur les émissions de GES en additionnant les émissions d'équivalent CO₂ sur plusieurs phases successives, les émissions relatives à chaque phase étant calculées en multipliant le taux d'utilisation de certains intrants par un coefficient d'émissions de GES associé à cet intrant.

2.2. Limites des méthodes et des instruments d'ACV actuels

Les méthodes d'ACV actuelles sont très aléatoires et présentent des omissions substantielles (Delucchi 2004 ; Delucchi, 2006 ; Pennington, Potting *et al.* 2004 ; Rebitzer, Ekvall *et al.* 2004 ; Arons *et al.*, 2007). Certains aspects liés à ces lacunes et à ces ambiguïtés sont examinés ci-après, notamment les effets soumis à la médiation du marché, les changements d'affectation des terres, l'impact des émissions sur le climat, ainsi que les données incertaines et très variables. La recherche visant à améliorer les méthodes d'ACV est un élément essentiel pour essayer de comprendre les incidences énergétiques et les effets sur les émissions de GES des biocarburants.

2.2.1. Effets soumis à la médiation du marché

Les politiques énergétiques et environnementales ont une incidence sur les prix qui, à leur tour, influent sur la consommation et par conséquent sur la production, qui fait varier quant à elle les émissions. Les émissions de GES sont donc soumises aux mécanismes du marché, notamment l'intersection entre les marchés des denrées alimentaires et de l'énergie à l'échelon tant national que mondial.

Nombre de filières de production de carburant fournissent de multiples produits comme les denrées alimentaires, les aliments pour animaux ou les co-produits chimiques. D'un point de vue théorique, la meilleure façon de gérer cet aspect dans le cadre d'une ACV des émissions de GES consiste à inclure toutes les émissions produites par l'ensemble du processus de production conjointe puis à modéliser les phénomènes liés à la production et, par conséquent, aux émissions, sur les marchés concernés par la production de l'ensemble des « co-produits » (tous les produits conjoints autres que le produit examiné). Ce système forme la base de ce que l'on a appelé l'approche fondée sur le « remplacement » ou « l'extension du système » pour estimer les impacts des co-produits sur les émissions¹. Cependant, la plupart des applications de cette méthode partent du principe que chaque unité de co-produit manufacturée avec le biocarburant implique qu'une unité n'est *pas* fabriquée ailleurs et « remplace » ainsi l'autre production, alors qu'en réalité, le degré de remplacement est le résultat dynamique des interactions entre les marchés et il n'atteint pas en général un rapport de un à

un. Par conséquent, les ACV qui tiennent tout simplement pour établi un remplacement de « un pour un » surestiment le « gain lié au remplacement ». L'idéal serait d'utiliser un modèle économique pour déterminer l'effet des co-produits sur leurs marchés ainsi que la mesure dans laquelle les co-produits remplacent l'autre production. Il n'existe aucune ACV dotée d'un modèle économique incorporé, bien que le modèle LEM présente un paramètre unique conçu pour prendre en compte les effets des co-produits soumis à la médiation du marché (Delucchi, 2003).

Le problème de la production conjointe se vérifie également pour le raffinage du pétrole. Une raffinerie transforme le pétrole brut en une vaste gamme de produits, notamment de nombreux combustibles, les produits pétrochimiques ainsi que l'asphalte. Un changement dans la demande d'un produit, comme l'essence, peut influencer sur la production et sur le prix des autres produits. Il est nécessaire de disposer d'un modèle des coûts de production des raffineries et de la demande de l'ensemble des produits raffinés pour évaluer les changements d'équilibres dans la production et la consommation et, enfin, les émissions. Aucun modèle d'ACV de la génération actuelle ne comprend ce type d'analyse.

2.2.2. *Modification de l'affectation des terres*

La modification de l'affectation des terres fait partie des effets soumis à la médiation du marché les plus importants découlant de l'expansion de la production de biocarburant. Une hausse des prix du pétrole ou un changement de stratégie peut se traduire par une production plus étendue de biocarburants d'origine végétale déplaçant les écosystèmes indigènes, la production agricole existante ou les terres gelées. Le changement d'utilisation des sols et de la végétation peut modifier certains paramètres physiques tels que l'albédo (réflectivité), l'évapotranspiration et les flux de chaleur sensible et latente, qui ont un effet direct sur l'absorption et la consommation de l'énergie sur la surface terrestre et influencent par conséquent les températures locales et régionales (Marland, Pielke *et al.* 2003 ; Feddema, Oleson *et al.* 2005). Certains de ces effets sont plus importants à l'échelon régional que mondial, tandis que les changements mondiaux découlent de l'évolution des stocks de carbone (dans le sol et la biomasse) ainsi que des émissions de N_2O et de CH_4 . Ce dernier phénomène n'est pas nécessairement dû aux changements d'utilisation des sols, mais il découle de l'utilisation d'engrais et d'autres formes de gestion (d'usage) des terres par l'homme. En outre, le remplacement de la végétation indigène par des matières de base pour la production de biocarburants ainsi que la culture de biomasse qui s'ensuit peuvent également modifier de façon significative la quantité de carbone stocké dans la biomasse et le sol et, par conséquent, modifier le volume de CO_2 émis dans l'atmosphère ou retiré de celle-ci par rapport au scénario de référence considéré.

En produisant des biocarburants sur une parcelle donnée, la demande de produits issus de l'ancienne utilisation du sol n'est plus satisfaite et, dans le temps, la nouvelle production devra satisfaire au moins une partie de cette demande (il est probable que les prix augmentent, réduisant ainsi la consommation dans une certaine mesure, bien qu'il soit à prévoir que cet effet soit minime, étant donné que la demande de denrées alimentaires est très inélastique). Cette « production remplacée » pourrait entraîner des émissions de GES ou avoir des répercussions sur d'autres aspects environnementaux tels que l'érosion du sol et la déforestation. Les modèles d'analyse du cycle de vie des carburants les plus courants ignorent (ou prennent en compte trop sommairement) les changements d'affectation des terres liés à la culture de biomasse en vue de la production de biocarburants. Le modèle LEM représente une exception : il examine dans le détail l'impact climatique des changements dans le piégeage du carbone découlant de l'évolution de l'utilisation des sols (Delucchi, 2003, 2006).

Bien que l'importance de ces effets soit généralement reconnue par tous, il n'existe aucune méthode bien établie pour calculer leur ampleur. Delucchi (2003, 2006) propose une méthode permettant d'estimer la valeur actuelle des émissions de dioxyde de carbone dues au changement d'affectation des terres tout au long de la vie d'un programme de production de biocarburant, mais cette méthode n'a jamais été mise en pratique, pas plus que d'autres d'ailleurs.

2.2.3. Effets des émissions sur le climat

Les incidences des autres agents polluants, le choix des potentiels de réchauffement global (PRG) relatifs à des gaz spécifiques ainsi que l'analyse des facteurs d'émissions de dioxyde de carbone non constants à partir de la dynamique de production, de raffinage et d'utilisation finale des biocarburants représentent des aspects déterminants pour affiner davantage les modèles. Par exemple, la plupart des ACV des carburants prennent en compte uniquement trois types de GES (le CO₂, le CH₄ et le N₂O) et utilisent les potentiels de réchauffement global (PRG) élaborés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour convertir les GES autres que le CO₂ en équivalents carbone. Les PRG élaborés par le GIEC assimilent un gaz à un autre en fonction de son forçage radiatif sur une période de 100 ans, en supposant une altération exponentielle des gaz (avec des fonctions d'altération multiples dans le cas du CO₂).

Cependant, toutes les émissions atmosphériques – y compris le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), l'oxyde d'azote (NO_x), l'oxyde de soufre (SO_x) et l'ammoniaque (NH₃) – ainsi que les émissions d'aérosols ont un effet sur le climat. Le modèle LEM (Delucchi, 2003, 2003a, 2006) prend en compte les incidences sur le climat d'une variété considérable d'émissions atmosphériques. En outre, le noir de carbone qui entre dans la composition des aérosols produit un effet extrêmement puissant sur le réchauffement de la planète (Menon, Hansen *et al.*, 2002) et les moteurs diesel représentent la principale source d'émissions de noir de carbone. Très peu d'ACV tiennent compte du noir de carbone, à quelques récentes exceptions près (Delucchi (2003a, 2006) et Colella *et al.*). Les États-Unis et l'Europe appliquent désormais des normes strictes, fondées sur des critères sanitaires, sur les émissions de noir de carbone mais dans nombre d'autres pays ces normes n'existent pas (ou ne sont pas appliquées). Cela laisse supposer que si les émissions de noir de carbone sont susceptibles de diminuer à l'avenir dans certains milieux, elles peuvent être considérables ailleurs.

Tous les modèles d'ACV ne traitent pas les émissions de la même façon, y compris lorsqu'elles sont effectivement prises en compte. Par exemple, le modèle GREET ne tient pas compte des émissions de N₂O dues à l'azote atmosphérique fixé par le soja, contrairement au modèle LEM, qui contribue à une estimation de l'impact du biodiesel de soja sur le réchauffement de la planète pratiquement supérieure, par ordre de grandeur (Delucchi, 2006).

2.2.4. Données incertaines et variables

Dans la pratique, *toutes* les valeurs faisant partie du calcul du cycle de vie des émissions de GES sont incertaines. Les facteurs liés aux émissions sont, en général, encore plus incertains car ils représentent habituellement des processus naturels variables dans le temps – ou l'espace – ou sont le résultat d'une ACV précédente. Dans bien des cas malheureusement, il existe si peu de données sur les émissions réelles qu'il est probable que l'on connaisse seulement l'ordre de grandeur des émissions du simple au double. Par exemple, les émissions d'hémioxyde d'azote issues des véhicules pourraient contribuer, dans une mesure de 3 pour cent à 10 pour cent, aux émissions du cycle du carburant que l'on peut simplement évaluer. Des études de suivi sur site sont nécessaires pour valider, non seulement

les modèles d'ACV actuels et futurs, mais aussi, sur le long terme, les étiquettes des GES associées aux combustibles, telles que celles qui seront nécessaires en Californie et dans d'autres États qui adoptent des normes de carburants à faible teneur en carbone (Arons *et al.*, 2007 ; Brandt *et al.*, 2007).

Les niveaux d'utilisation des intrants dans le processus peuvent également se révéler extrêmement incertains, notamment dans le cas de l'évaluation des effets moyens (par exemple l'impact moyen sur le réchauffement de la planète de l'éthanol produit aux États-Unis) calculée sur un ensemble hétérogène d'installations utilisant des combustibles variés avec une efficacité variable. Dans nombre de cas, les taux d'utilisation des intrants s'appuient sur des valeurs autodéclarées et non vérifiées issues d'un sous-ensemble d'entreprises intéressées par une pratique spécifique et sélectionnées de manière autonome. Il est impossible d'obtenir à partir de ces données des distributions de probabilités significatives d'un point de vue statistique (notamment si l'objectif est de prévoir l'utilisation future de carburant, aspect qui sera examiné par la suite). Dans d'autres cas, les niveaux d'utilisation des intrants sont déduits des statistiques connexes. Par exemple, les études statistiques de la production agricole du Ministère de l'Agriculture des États-Unis n'effectuent pas de suivi de la consommation d'énergie dans l'agriculture ; la consommation d'énergie est estimée à partir des dépenses en combustibles selon des hypothèses sur les prix moyens des combustibles. On ne voit pas bien comment ce processus produit des erreurs dans les estimations obtenues.

L'évolution du piégeage du carbone dans la biomasse et le sol due aux changements d'utilisation des sols liés à la création de biomasse utilisée comme matière de base pour les biocarburants est une source d'émissions souvent mal décrite. Des données générales relatives à la teneur en carbone des sols et des plantes sont disponibles, mais de fortes variations peuvent exister d'un site à l'autre. L'incertitude inhérente aux facteurs de stockage du CO₂ liés à l'affectation des sols peut modifier de plusieurs points de pourcentage les émissions d'équivalent CO₂ sur le cycle de vie.

Si la distribution de probabilités relatives à chaque taux d'utilisation et chaque facteur d'émission ainsi que les corrélations entre ceux-ci étaient bien définies, il serait possible d'utiliser des méthodes statistiques types ou une simulation de Monte-Carlo pour propager l'incertitude au sein du modèle d'analyse du cycle de vie afin de comprendre l'incertitude globale du résultat. Dans la pratique cependant, la distribution de nombreuses probabilités est inconnue. En outre, même avec un échantillonnage complet et précis de la pratique courante (par exemple en ce qui concerne la consommation de combustibles dans les installations de production d'éthanol), il serait peu aisé d'utiliser ces informations pour prévoir les pratiques futures (à savoir, dans ce cas, la consommation de combustibles dans les futures installations de production d'éthanol). Afin d'utiliser rationnellement les distributions de probabilités pour prévoir les évolutions à venir, il a fallu construire un modèle présentant des paramètres (comme le coût des combustibles) susceptibles d'être eux-mêmes décrits de façon appréciable par des distributions de probabilités objectives, ce qui semble impossible à l'heure actuelle. Cependant, une enquête sur la sensibilité des méthodes d'ACV à l'incertitude de divers paramètres, afin de comprendre comment mieux appréhender les incidences climatiques des différents carburants de transport, semble réalisable. Toutefois, il est peu probable que les techniques classiques de Monte-Carlo (et autres analyses analogues) se révèlent utiles pour l'instant.

2.3. Approches analytiques de la modélisation du changement d'affectation des terres

Le changement d'affectation des terres a des incidences tant locales que mondiales. Le fait que certains changements d'utilisation des sols associés à la production végétale bio-énergétique soient directs et d'autres indirects vient compliquer davantage la situation. Aux États-Unis, par exemple, la conversion de la production d'éthanol de soja en production d'éthanol de maïs (changement direct)

agit, dans une mesure inconnue, sur la culture de soja pour l'alimentation en Amazonie (changement indirect). Cependant, peu de données sont disponibles sur les effets indirects de la conversion de l'affectation des terres et aucune stratégie portant sur ces effets n'a été fixée (Delucchi 2004, 2006 ; Tilman, Hill *et al.* 2006 ; Mathews, 2007).

Les effets de la conversion de l'affectation des terres associés à la production de biocarburant sont potentiellement significatifs, qu'il s'agisse aussi bien des effets directs liés à la conversion pour la production de biocarburant que des effets indirects soumis à la médiation des marchés des produits et du marché foncier. Il serait très difficile d'inclure avec précision tous les changements indirects d'utilisation des sols associés à la production de biocarburant. Étant donné notamment les lacunes considérables dans les données, le caractère aléatoire des modèles et les profondes incertitudes liées aux politiques futures et aux prix, l'utilité de cet exercice *pour une prévision de l'impact sur le réchauffement de la planète présentant un intérêt réel dans un contexte réglementaire* est contestable.

En outre, le fait d'exclure la conversion de l'affectation des terres à l'échelon mondial attribue effectivement une valeur zéro à cet effet, ce qui produit comme chacun sait une estimation médiocre. En revanche, une norme sur les carburants à faible teneur en carbone, motivée par une action des pouvoirs publics, pourrait inclure une estimation approximative de la proportion des émissions dues à la conversion de l'affectation des terres à l'échelon mondial et potentiellement susceptibles d'être imputables aux agrocarburants. Cette estimation, pour indicative qu'elle soit, permettrait de faire passer le juste message quant aux modes de production des biocarburants impliquant un changement d'utilisation des sols.

Comme l'illustre l'analyse du modèle LEM, les variations des stocks de carbone liées à la déforestation et à la détérioration du sol sont probablement les principaux facteurs associés au changement d'affectation des terres influençant le climat de la planète (Delucchi, 2006). Les travaux relatifs au bilan du carbone terrestre comprennent des estimations des émissions de dioxyde de carbone associées au changement d'utilisation des sols sur la planète (Houghton 1999 ; Potter 1999 ; Schimel, House *et al.* 2001 ; Houghton 2003). D'une manière générale, l'écosystème terrestre constitue un puits net de dioxyde carbone (Schimel, House *et al.* 2001). Cependant, on estime que le changement d'affectation des terres contribuait aux émissions de carbone à hauteur de 0.6 à 2.5 gigatonnes par an dans les années 80 et de 0.8 à 2.4 gigatonnes dans les années 90 (Schimel, House *et al.*, 2001). Étant donné que ces estimations s'appuient souvent sur une agrégation des données relatives aux conversions spécifiques de l'utilisation des sols selon une approche du bas vers le haut, il est possible de calculer l'apport spécifique du changement d'utilisation des sols lié aux cultures végétales. D'après une de ces analyses, environ 1.3 gigatonnes de carbone étaient à attribuer au changement d'affectation des terres lié aux cultures végétales dans les années 80 (Houghton, 1999). Le Tableau 1 présente, à titre d'exemple, des chiffres permettant d'estimer les émissions liées à l'affectation des sols.

L'approche simple présentée ci-dessous produit des valeurs entraînant des effets sur le réchauffement planétaire supérieurs à ceux de l'essence pour la plupart des agrocarburants nationaux. Bien que toute tentative visant à calculer ces valeurs soit incertaine et sujette à discussion, attribuer une valeur zéro aux émissions découlant de la conversion de l'utilisation des sols à l'échelon de la planète signifie à l'évidence sous-estimer ces effets. Par conséquent, nous croyons que la mesure de précaution consistant à attribuer une valeur autre que zéro est appropriée, étant donné qu'il est important de lancer des signaux et de proposer des mesures d'incitation en faveur de l'innovation et des investissements.

Tableau 1. Calcul indicatif du changement d'affectation des terres relatif à différentes matières de base

	Éthanol		
Matières de base (g-CO ₂ e/kg)	<i>Maïs</i>	<i>Herbages</i>	<i>Bois</i>
Sol	96	48	45
Biomasse	4	5	-31
Total	100	54	14
production de carburant (L/Mg)	83	70	67
Teneur énergétique (MJ/L, HHV)	24	24	24
Émissions (g CO ₂ e/MJ)	51	32	9
On utilise ici 60 lbs/boisseau pour le soja, 56 pour le maïs et 948.452 BTU/MJ.			

Alors que l'introduction des coûts premiers de la conversion d'utilisation des sols dans le calcul des émissions de GES dues aux biocarburants utilisé pour attribuer une étiquette aux biocarburants ou les réglementer produira une pondération plus adaptée entre les agrocarburants et les autres combustibles, cette réglementation peut ne pas être le mécanisme le plus approprié pour influencer le changement climatique accompagnant la conversion de l'utilisation des sols. La production de biocarburant ne représente qu'une infime proportion de l'utilisation des terres à l'échelon planétaire (<5 pour cent), mais celle-ci est appelée à augmenter et aura une incidence de plus en plus prononcée sur l'ensemble du système d'affectation des terres. Nombre de ces changements seront de nature indirecte. Un système de limitation globale de la conversion de l'utilisation des sols et du changement climatique, agissant indépendamment de la réglementation sur les carburants, permettrait de minimiser les effets négatifs sur le climat de l'utilisation des sols. Il n'existe cependant aucune réglementation de ce type et sa mise en œuvre à l'échelon mondial pourrait être entravée par des obstacles de taille.

Si l'initiative globale visant à ralentir la déforestation et à contrôler les contraintes sur le changement climatique qui accompagnent la conversion de l'utilisation des sols se révèle efficace, les coûts premiers liés à cette conversion décrits ci-dessus diminueront. Inversement, si la production d'agrocarburants et la demande croissante d'une population mondiale de plus en plus nombreuse et opulente pèsent davantage sur la forêt et les ressources du sol, les coûts premiers du changement d'affectation des terres augmenteront. Ces coûts devraient être réévalués périodiquement, afin de refléter la conjoncture actuelle, bien que, dans la pratique, ces mises à jour puissent être limitées par la disponibilité des données. La nécessité d'actualiser ces valeurs en fonction de l'évolution des marchés crée inévitablement un certain degré d'incertitude de nature normative, bien que l'ampleur du changement lié à chaque mise à jour doive se stabiliser lorsqu'une méthodologie adaptée aura été fixée.

3. EFFETS DU CHANGEMENT D'AFFECTION DES TERRES : UN CADRE PRÉLIMINAIRE

Qu'en est-il des émissions de carbone provenant du sol et de la biomasse et découlant des conversions de l'utilisation des sols liées à des interventions intéressant un biocarburant ou une matière de base spécifiques (par exemple l'éthanol extrait du maïs)? Le nombre de grammes d'émissions d'équivalent CO₂ dues au changement d'affectation des terres par BTU de biocarburant produit représente une mesure utile qui permet de fournir une réponse à cette question. Cette quantité peut être estimée de la manière suivante :

$$FLUCE_F = FEA_F \cdot \sum_L LUCE_{L \rightarrow L^*} \cdot LUC_{F:L \rightarrow L^*}$$

où :

$FLUCE_F$ = les émissions découlant du changement d'affectation des terres dû à la production de biocarburant F (grammes d'émissions d'équivalent CO₂ par BTU de carburant F produit) ;

FEA_F = la quantité d'énergie produite par unité de surface par le biocarburant F (BTU de carburant F produit par hectare de terre sur lequel la matière première de la biomasse est cultivée pour produire F) ;

$LUCE_{L \rightarrow L^*}$ = les émissions par hectare de terre convertie du type L au type L^* (grammes d'émissions d'équivalent CO₂ par hectare de terre ainsi convertie) ;

$LUC_{F:L \rightarrow L^*}$ = la fraction d'un hectare de terre convertie du type L au type L^* par hectare de terre sur lequel la matière première de la biomasse est cultivée pour produire F) ;

Indice L = les catégories d'occupation des sols (par exemple, forêt tropicale, prairies tempérées).

La quantité d'énergie produite par unité de surface FEA est assez bien connue. Des données sont disponibles pour estimer les émissions de carbone du sol et de la biomasse dues à une conversion de l'affectation des terres et ce, pour différents types d'utilisation des sols (paramètre $LUCE$), bien qu'il existe une forte variabilité dans les données relatives à des types d'occupation du sol génériques, en raison de la variabilité du climat, de la topographie, des caractéristiques du sol, des techniques de gestion et d'autres facteurs déterminant le piégeage et les émissions de carbone. Cependant, il est extrêmement difficile d'estimer la façon dont l'utilisation des sols évolue (paramètre LUC) et nous mettrons donc plus particulièrement l'accent sur ce paramètre.

Étant donné que l'ensemble de valeurs du paramètre LUC_F dépend probablement, non seulement du carburant F , mais aussi de la politique ou de l'action par laquelle F est produit, l'idéal serait d'estimer LUC_F en utilisant un modèle sophistiqué comprenant des représentations détaillées de l'économie agricole, de l'affectation des terres, des politiques, des échanges commerciaux et d'autres aspects encore. Des modèles de la sorte existent et ont récemment été utilisés, précisément pour étudier ces aspects (voir www.biofuelassessment.dtu.dk/). Cependant, on peut raisonnablement mettre en doute le fait que ces modèles soient suffisamment sophistiqués pour fournir des estimations fiables des changements d'affectation des terres liés à la production de biocarburant, étant donné la complexité des stratégies et des marchés agricoles, énergétiques et fonciers à l'échelon mondial. Si tel est le cas en revanche, des méthodes plus simples peuvent être proposées pour estimer les paramètres pertinents de l'équation présentée ci-dessus, pour autant que les méthodes prennent en compte tous les effets pertinents et que les émissions soient supposées représenter la réalité, ne serait-ce que de façon simplifiée.

Par conséquent, plutôt que de s'efforcer d'élaborer un modèle sur la façon dont certains types d'utilisation du sol évolueront sous l'effet de mesures en faveur de certaines cultures particulières, on pourrait soutenir que, du fait de l'interconnexion globale entre la terre et les marchés agricoles, les futures valeurs relatives à certaines cultures particulières ne s'écarteront guère des moyennes mondiales historiques entre toutes les cultures. Les données historiques peuvent être utilisées pour estimer les moyennes globales relatives au paramètre LUCE, et probablement aussi au paramètre LUC, pour l'ensemble de la biomasse (cultures) et des types d'occupation du sol. Par exemple, Houghton et Hackler (2001) fournissent des estimations des émissions dues au changement d'affectation des terres par type de changement ainsi que des évolutions historiques de l'affectation des terres par type d'occupation du sol. À partir de ces données, il est possible de calculer une quantité moyenne par hectare des émissions dues au changement d'affectation des terres pour tous les types d'occupation du sol (paramètre LUCE).

Cependant, le calcul d'une valeur globale du paramètre LUC (hectares de terres converties par hectare de terre mise en production) pour toutes les cultures et tous les types d'occupation des sols ne va pas nécessairement de soi. Nous utilisons ci-après un exemple pour illustrer l'interprétation et la portée éventuelle de ce paramètre.

Prenons un agriculteur possédant 11 hectares de terre. Dans le scénario de base « sans biocarburant », un hectare est constitué de surfaces en herbe non cultivées et 10 hectares sont consacrés à la culture du maïs et produisent 100 boisseaux par hectare, fournissant ainsi au marché un total de 1 000 boisseaux. Dans le scénario avec biocarburant, la nouvelle demande de maïs provenant d'une nouvelle installation de production de biocarburant entraîne une hausse des prix du maïs et l'agriculteur s'engage à fournir à la nouvelle usine d'éthanol 100 boisseaux supplémentaires de maïs par an, tout en continuant à produire 1 000 boisseaux sur l'autre marché. Si l'on ignore pour l'instant l'effet de la hausse des prix sur la demande de maïs, la palette d'options à disposition de l'agriculteur dans ce scénario de production de biocarburant est déterminée par deux mesures. Premièrement, il peut tout simplement cultiver les 100 boisseaux supplémentaires sur la terre qui aurait été réservée aux herbages non cultivés (à savoir le onzième hectare). Dans ce cas, l'hectare et les 100 boisseaux de maïs produits pour le marché des biocarburants entraînent un changement d'affectation des terres sur un hectare – l'hectare de surface en herbe – et la valeur du paramètre LUC (hectares de terres converties par hectare de terre mise en production pour alimenter le marché des biocarburants) correspond donc à 1.0.

Dans le deuxième cas, l'agriculteur peut laisser de côté la surface en herbe et décider – justement à cause de la hausse des prix du maïs – qu'il vaut la peine d'engager les dépenses supplémentaires nécessaires pour accroître le rendement à 110 boisseaux par hectare sur les 10 hectares (en utilisant

davantage d'engrais ou d'eau par exemple) plutôt que de cultiver le onzième hectare de surface en herbe avec un rendement de 100 boisseaux l'hectare. Dans ce cas, il utilise effectivement 0.91 hectares pour produire les 100 boisseaux de maïs destinés au marché des biocarburants, tandis que les 9.1 hectares restants fournissent les 1 000 autres boisseaux au marché. Ainsi, les 0.91 hectares et les 100 boisseaux de maïs produits pour la fabrication de biocarburant n'entraînent aucun changement d'affectation des terres (excepté les effets de l'intensification proprement dits) et le paramètre LUC correspond par conséquent à zéro. Naturellement, l'agriculteur peut opter pour une solution intermédiaire.

A cet égard, deux aspects sont importants. Premièrement, l'augmentation du rendement dans le deuxième scénario doit être spécifiquement imputable à la hausse des prix du maïs et non à un processus d'augmentation du rendement en cours dans le scénario de base, sous l'effet de la recherche et développement continue et de la pression concurrentielle pour accroître la production.

Deuxièmement, notre exemple ne tient pas compte jusqu'ici de l'effet de l'évolution des prix sur la demande. Par exemple, il est possible qu'en raison de la hausse des prix du maïs, l'agriculteur vende seulement 990 boisseaux sur l'autre marché au lieu des 1 000 boisseaux prévus dans le scénario de référence sans biocarburant. Dans ce cas, l'agriculteur peut alors utiliser 0.1 hectare désormais disponible sur les 10 hectares pour produire 10 boisseaux de maïs destinés au marché des biocarburants, puis cultiver 0.9 hectare sur le onzième hectare d'herbages pour produire les 90 boisseaux de maïs restants pour le marché des biocarburants. Ici, un hectare de maïs destiné à la production d'éthanol entraîne la conversion de 0.9 hectare d'herbages et le paramètre LUC, compte tenu de ce facteur, correspond alors à $0.9/1.0 = 0.9$.

Comme mentionné précédemment, l'inélasticité de la demande alimentaire laisse supposer que l'élément d'effet de prix du paramètre LUC (selon lequel la hausse des prix due à la demande de biocarburant supprime la consommation sur les autres marchés) sera probablement peu significatif. Cependant, l'effet d'intensification du rendement selon lequel la hausse des prix encourage une augmentation supplémentaire du rendement (au-dessus de la moyenne) est inconnu. (Pour un examen plus détaillé de l'effet d'intensification du rendement, voir Kløverpris *et al.* [2007]).

Il n'est pas évident de savoir s'il existe une manière simple d'estimer une valeur moyenne historique du paramètre LUC sur toutes les cultures. La difficulté essentielle repose sur le fait que LUC dépend en fin de compte des fonctions d'offre et de demande, tandis que le phénomène observé est l'évolution de la consommation, de la production et des prix. Toutefois, il peut être possible de procéder à des estimations utiles du paramètre LUC à partir des déductions tirées de l'évolution de la consommation et des prix sans avoir à procéder à une modélisation de l'équilibre général. Des travaux plus approfondis sont nécessaires dans ce domaine.

Enfin, il convient de noter deux aspects méthodologiques importants et étroitement liés qui sont incorporés dans l'estimation du paramètre LUCE dans l'équation ci-dessus. Premièrement, la période pendant laquelle a lieu la production de carburant issue d'un hectare de terre n'est pas la même que celle pendant laquelle interviennent les émissions dues à la conversion de l'utilisation des sols. Deuxièmement, on peut supposer que la production annuelle de carburant issue d'un hectare de terre est constante, alors que les émissions annuelles dues à la conversion de l'utilisation des terres ne le sont pas. Certaines transformations sont nécessaires dans l'une ou l'autre des filières, afin de séparer correctement émissions et production de carburant. Delucchi (2003) utilise pour ce faire la méthode d'annualisation/actualisation, mais d'autres méthodes sont également possibles.

4. COMPARAISON DES ANALYSES RÉCENTES SUR LES BIOCARBURANTS

Les travaux relatifs à l'ACV des biocarburants comprennent des analyses contradictoires ; en outre, les études publiées s'appuient souvent sur des unités et des limites de systèmes différentes, ce qui rend les comparaisons d'une étude à l'autre peu aisées. Dans cette section, nous présentons à titre d'exemple une comparaison entre six documents évaluant la même filière de production de biocarburant, à savoir la production d'éthanol à base de maïs aux États-Unis (Farrell *et al.*, 2006). Toutes ces études utilisent les méthodes d'ACV appartenant à la génération actuelle et, par conséquent, ignorent ou accordent peu de poids à certains aspects importants. Toutefois, une comparaison entre ces travaux n'en reste pas moins utile pour illustrer la façon dont ces différents résultats peuvent être obtenus.

Le modèle d'analyse EBAMM (ERG *Biofuel Analysis Meta-Model*, disponible en ligne à l'adresse <http://rael.berkeley.edu/ebamm>) est un instrument transparent relativement simple pour comparer les processus de production de biocarburant. EBAMM peut être téléchargé et utilisé gratuitement. Nous avons utilisé le modèle EBAMM pour comparer six articles publiés illustrant la gamme d'hypothèses et de données obtenues pour un biocarburant, à savoir l'éthanol extrait du maïs (Wang 2001 ; Graboski 2002 ; Patzek 2004 ; Shapouri, Duffield *et al.* 2004 ; Dias de Oliveira, Vaughan *et al.* 2005 ; Pimentel et Patzek 2005). Bien que ces six études fournissent des résultats assez divergents, la structure fondamentale de l'analyse sur laquelle ils s'appuient est pratiquement identique. Il est à noter que le modèle EBAMM ne vise ici que ces six études et, par conséquent, ne tient pas ou peu compte d'aspects exclus ou peu examinés par ces études, y compris notamment le changement d'affectation des terres et les technologies d'utilisation finale.

Chaque étude calcule la consommation d'énergie fossile (charbon de bois, gaz naturel et pétrole) à chaque étape du processus de production, ce qui permet ainsi d'estimer l'énergie primaire totale nécessaire pour produire l'éthanol. Des mesures analogues sont effectuées dans les feuilles de calcul relatives aux émissions nettes de GES. Les feuilles de calcul dénommées « *petroleum* » et « *GHG* » présentent un récapitulatif des résultats.

Le cas de l'éthanol *cellulosique* présenté ici est une évaluation préliminaire d'une technologie en rapide évolution destinée à mettre en relief les réductions considérables de GES annoncées ; cette évaluation ne doit pas être considérée comme une représentation définitive du potentiel offert par cette technologie. En outre, d'autres technologies de production de biocarburant, qui ne sont pas du tout abordées dans l'analyse, font actuellement l'objet d'innovations actives.

Si les six études comparées ici présentent de fortes analogies, chacune d'entre elles tient compte de différentes limites de systèmes. Pour rendre les résultats proportionnels, nous avons corrigé toutes les études, afin qu'elles respectent une limite de système cohérente. Deux paramètres, l'intrant calorique et le transport des travailleurs agricoles, ont été considérés hors des limites du système et ont donc été fixés à zéro dans les versions corrigées (ces facteurs sont minimes et ne modifieraient pas les résultats qualitatifs s'ils étaient inclus). Six paramètres ont été ajoutés ou relevés : l'énergie incorporée dans les machines agricoles, les intrants dans les conditionnements, l'énergie incorporée dans les biens

de production, l'eau consommée par le processus, le traitement des effluents et les gains liés à la valorisation des co-produits. Les co-produits classiques comprennent les drêches de distillerie séchées avec les solubles (*distillers dried grains with solubles* ou DDGS), les aliments à base de gluten de maïs et l'huile de germe de maïs, qui valorisent la production d'éthanol de l'ordre de 0.10 à 0.40 USD par litre d'éthanol de maïs.

Deux études se démarquent des autres, car elles relèvent des valeurs énergétiques nettes négatives et prévoient implicitement des émissions de GES relativement élevées ainsi que des intrants pétroliers importants (Patzek 2004 ; Pimentel et Patzek 2005). L'évaluation attentive nécessaire pour reproduire les résultats énergétiques nets a indiqué que ces deux études se démarquaient également des autres par le fait qu'elles partaient du principe que l'on ne devrait attribuer aux co-produits de l'éthanol (autrement dit les matières produites inévitablement lorsque l'éthanol est fabriqué, comme les DDGS, les aliments à base de gluten de maïs et l'huile de germe de maïs) aucune valeur approximative grossière des effets sur l'érosion du sol et qu'elles comprennent des données d'entrée anciennes, non représentatives des processus actuels, ou encore mal documentées, de sorte que leur qualité ne peut être évaluée (voir les Tableaux S2 et S3 dans la documentation supplémentaire en ligne de Farrell *et al.*, 2006, accessible à : <http://rael.berkeley.edu/ebamm>).

Les analyses de sensibilité réalisées avec le modèle EBAMM et dans d'autres situations indiquent que les calculs de l'énergie nette sont extrêmement sensibles aux hypothèses sur la répartition des co-produits (Kim et Dale 2002). Les co-produits de l'éthanol ont une valeur économique positive et remplacent des produits concurrents qui requièrent de l'énergie pour leur fabrication. Par conséquent, l'augmentation de la production d'éthanol pour répondre aux exigences de la Loi sur la politique énergétique de 2005 (EPACT 2005) fera en sorte que davantage de co-produits viendront se substituer aux farines de maïs complètes et aux farines de soja dans la nourriture pour animaux et que l'énergie ainsi économisée compensera en partie l'énergie nécessaire à la production d'éthanol (Delucchi 2004 ; *Food and Agricultural Policy Research Institute* 2005).

Il faut beaucoup moins de pétrole pour produire un mégajoule d'éthanol – dans toutes les filières examinées – que pour produire un mégajoule d'essence (Figure 4). Cependant, les critères d'évaluation des GES indiquent que les performances environnementales de l'éthanol varient énormément en fonction des processus de production. Toutefois, les évaluations à facteur unique fournissent probablement des orientations stratégiques médiocres. À partir des critères d'évaluation de l'intensité pétrolière, le scénario *Ethanol Today* serait légèrement préférable à celui de *Cellulosic* (un facteur d'intrants pétroliers de 0.06 contre 0.08) ; cependant, le scénario d'*Ethanol Today* donne un résultat d'émissions de GES supérieures par rapport au scénario *Cellulosic* (77 contre 11), bien que les deux filières présentent des émissions de GES inférieures par rapport à la production d'essence. La conversion indirecte des terres tend à faire augmenter cette disparité, car elle est davantage susceptible de s'appliquer à l'éthanol extrait du maïs plutôt qu'à l'éthanol cellulosique (notamment si les déchets ou les résidus sont utilisés comme matières de base cellulosiques).

Figure 4 (haut) Production nette d'énergie et de gaz à effet de serre lors de la production d'essence, six études et trois scénarios. (Bas) Production nette d'énergie et intrants pétroliers dans une situation identique. Dans ces Figures, les triangles vides représentent les données relevées fondées sur des hypothèses incommensurables, tandis que les triangles pleins représentent des valeurs ajustées fondées sur des limites de système identiques. L'essence classique est indiquée par des cercles orange et les scénarios EBAMM sont indiqués par des carrés verts. Les émissions de GES indirectes dues au changement d'affectation des terres ne sont pas comprises dans ces calculs et pourraient entraîner une augmentation significative des émissions dues à la production d'éthanol extrait du maïs. Cette Figure est apparue la première fois dans l'ouvrage de Farrell *et al.* 2006.

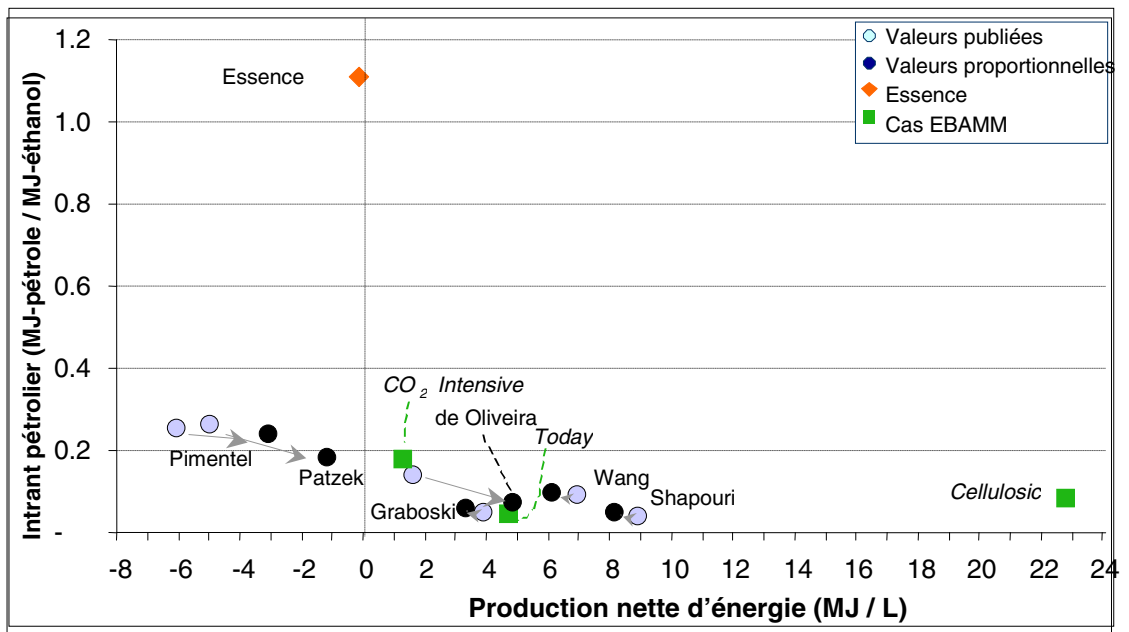
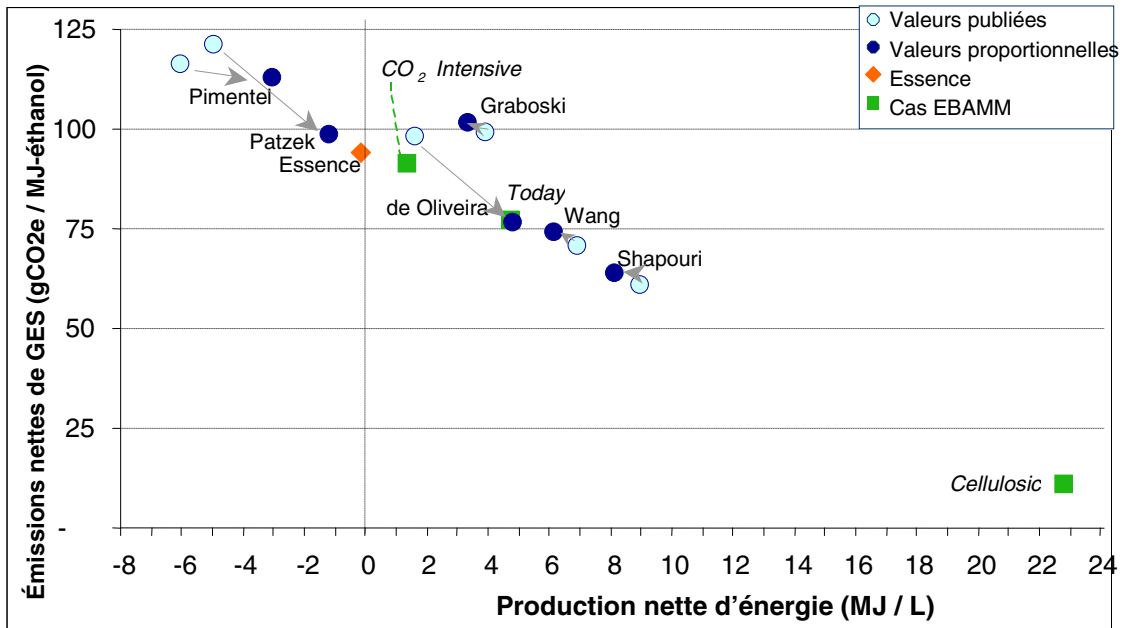
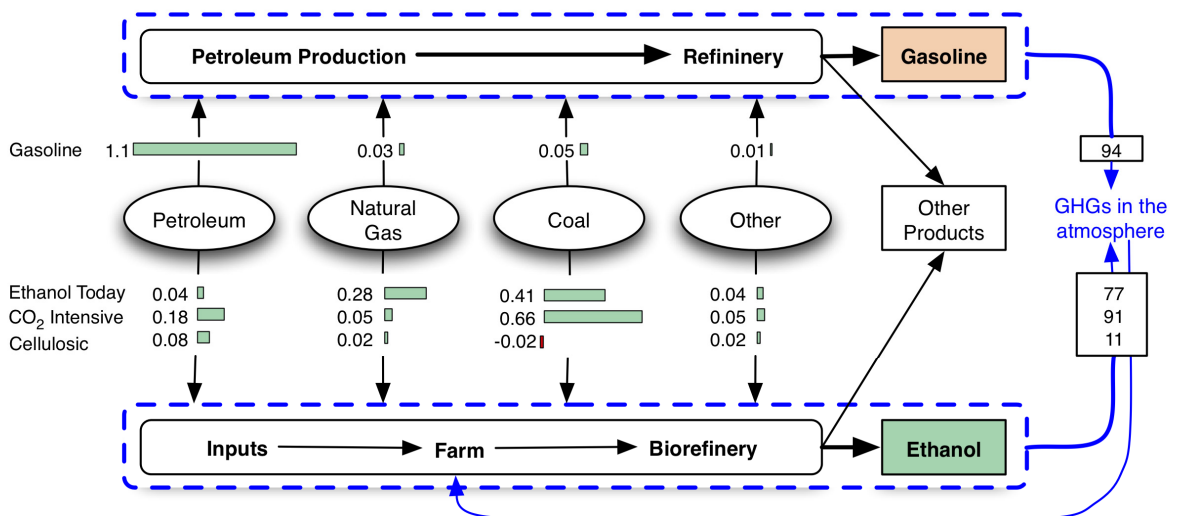


Figure 5. Différents critères d'évaluation possibles de l'éthanol à partir de l'intensité des intrants énergétiques primaires (MJ) par MJ de carburant et d'émissions nettes de gaz à effet de serre (équivalent kgCO₂) par MJ de carburant. Pour la production d'essence, tant les matières de base pétrolières que les intrants énergétiques pétroliers sont inclus. La catégorie « autres » comprend la production d'énergie nucléaire et hydroélectrique. Par rapport à la production d'essence, celle de l'éthanol aujourd'hui exige beaucoup moins de pétrole brut, mais beaucoup plus de gaz naturel et de charbon de bois. La production d'éthanol dans des bio-raffineries alimentées au lignite et éloignées du lieu de culture du maïs comporte une intensité de charbon élevée et une intensité de pétrole brut modérée. L'éthanol cellulosique devrait présenter une intensité extrêmement basse pour tous les combustibles fossiles et une intensité de charbon légèrement négative du fait de la vente d'électricité qui viendrait se substituer à celle de charbon. Les émissions de GES indirectes dues au changement d'affectation des terres ne sont pas comprises dans ces calculs et pourraient entraîner une augmentation significative des émissions dues à l'éthanol de maïs. Cette Figure est apparue la première fois dans l'ouvrage de Farrell *et al.* 2006.



Légende : Production de pétrole raffinerie essence

Essence

Pétrole Gaz naturel Charbon Autre Autres produits GES dans l'atmosphère Intrants
ExploitationBioraffinerie Éthanol

Les émissions de GES dues à la conversion indirecte des terres sont imputables aux biocarburants produits à partir de matières de base cultivées sur des terres arables en concurrence avec la production alimentaire. Ces valeurs préliminaires et essentiellement illustratives sont présentées au Tableau 1 ci-dessus. Si l'on examine sous cet angle le changement d'affectation des terres indirect, l'éthanol produit à partir de broyeurs à charbon entraîne des émissions de GES *supérieures* à celles de l'essence. L'éthanol cellulosique examiné est l'E85, qui comprend de l'éthanol produit à partir de systèmes herbagés mixtes, décrit par Tilman *et al.* (2006). Dans ce cas, les émissions négatives de GES importantes s'appuient sur l'hypothèse que les herbages qui nécessitent très peu d'intrants (par exemple les engrais) sont cultivés sur des terres détériorées impropres à la production alimentaire.

Dans ce cas, le carbone est stocké par les plantes herbacées, dans leurs racines et dans le sol. Le carbone peut être ainsi piégé pendant de longues périodes, mais il peut risquer d'être libéré si la terre doit être à nouveau convertie pour l'agriculture conventionnelle. Cette technologie n'a pas encore fait ses preuves et prête à controverse. En outre, son rendement par unité de surface est relativement peu élevé à cause de la faible quantité d'intrants ; cependant, la quantité de terrains dégradés disponibles pour cette culture pourrait être élevée. Il convient toutefois de noter que les avantages que présente ce scénario reposent sur le principe que les terrains dégradés resteraient ainsi s'ils n'étaient pas utilisés. Or cette hypothèse n'est pas forcément plausible, car il est toujours possible de restaurer un terrain dégradé pour le ramener à un état « naturel » permettant même de stocker davantage de carbone que ne le ferait un système herbagé mixte². Au demeurant, l'étude sur la faisabilité technique et commerciale de cette approche et son éventuelle application selon des modalités n'imposant aucune contrainte supplémentaire pour la conversion d'écosystèmes naturels en cultures pour la production de biocarburant occupe une place très importante dans la recherche.

Notons que le stockage du carbone dans les racines et le sol est également possible pour d'autres systèmes de culture de biomasse, notamment le panic érigé (*Panicum virgatum*) et le miscanthus ou herbe à éléphant (*Miscanthus x giganteus*). Ces espèces peuvent se révéler plus productives que les herbages et donc plus rentables que le système proposé par Tilman *et al.* (2006), tout en présentant un très bon profil sous l'angle des émissions de GES. Des initiatives importantes en matière de recherche et développement dans le domaine de la biotechnologie sont actuellement en cours pour améliorer ces espèces en établissant éventuellement une concurrence entre la production de biocarburant à partir de cultures semi-naturelles et celle reposant sur la monoculture à grande échelle d'espèces génétiquement modifiées. Il est également important de comprendre, dans le cadre de la recherche, comment évaluer les coûts et les avantages correspondants.

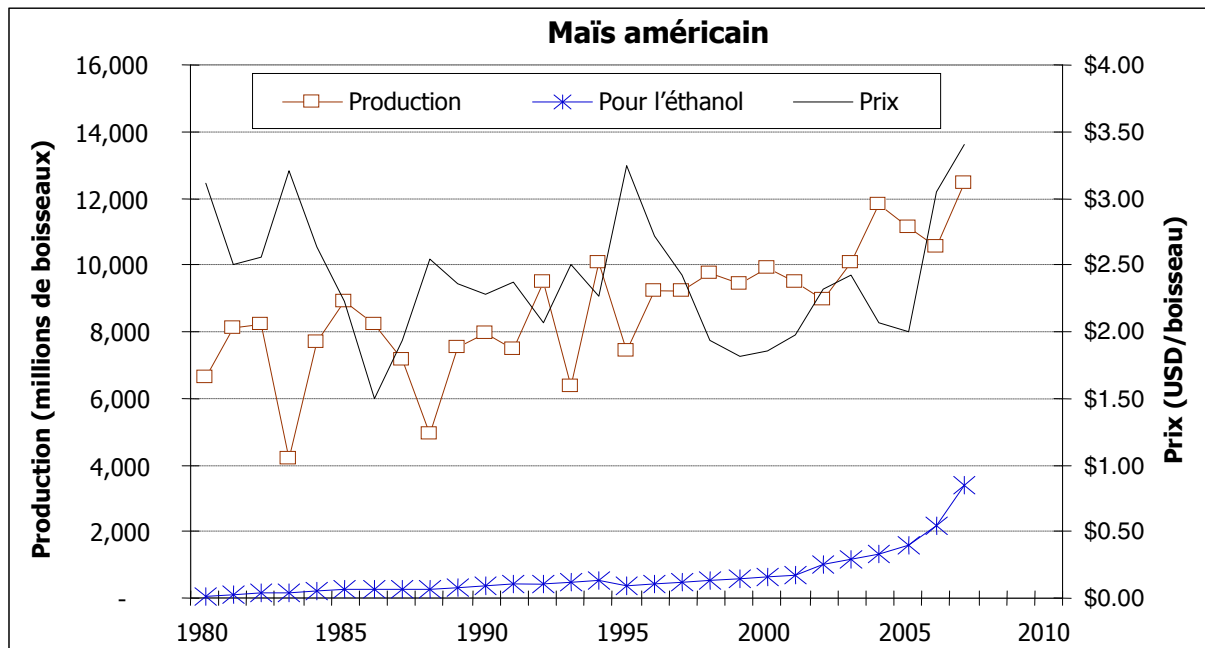
Il convient de remarquer en outre que les seules différences entre les scénarios relatifs à la production d'éthanol à partir du maïs résident dans la transformation de la biomasse ; toutes les autres étapes sont identiques dans les deux cas. Une meilleure représentation de la gamme d'émissions potentielles de GES associées à la production de matières de base et peut-être de la réduction de ces émissions indiquerait certainement des variations encore plus marquées.

5. DÉVELOPPEMENT DU MARCHÉ DES BIOCARBURANTS

La croissance de la demande globale de biocarburants (Figure 1) s'est traduite jusqu'ici par de fortes augmentations de l'échelle de production de l'éthanol et du biodiesel EMHV. L'incidence sur les prix dans les marchés de produits importants est un indicateur de l'ampleur de cette croissance. Prenons par exemple les changements sur les marchés du maïs aux États-Unis au cours du développement de l'industrie de l'éthanol (Figure 6). Depuis 1980, les prix moyens du maïs aux États-Unis ont dépassé le seuil de 3 USD le boisseau seulement cinq fois, notamment l'année dernière et cette année (prévision). Notons que dans les cas précédents (en 1980, 1983 et 1995), la hausse des prix du maïs s'est accompagnée d'un déclin marqué de la production. En revanche, en 2006 et 2007 (prévision), la hausse des prix devrait normalement s'accompagner d'une augmentation de la production. On prévoit en effet que tant les prix moyens du maïs que la production totale de maïs en 2007 établiront de nouveaux records. La demande supplémentaire de maïs de la part des producteurs d'éthanol fait augmenter les prix du maïs, car la nouvelle production de maïs entraîne une

hausse des coûts de production, due à la concurrence accrue avec d'autres modes d'utilisation des terres, à l'expansion des terres moins productives et à la nécessité d'utiliser des méthodes de production plus coûteuses. Étant donné que le maïs est un produit commercialisé mondialement et que le marché du maïs influence celui des autres produits agricoles comme le sucre et les aliments pour animaux, la hausse des prix du maïs tend à faire augmenter le prix des autres céréales. Au cours de ces dernières années, la demande de maïs provenant des producteurs d'éthanol a augmenté plus rapidement que la production totale de maïs aux États-Unis, contribuant ainsi à la baisse des exportations de maïs et à la hausse des coûts de l'alimentation animale.

Figure 6. **Production de maïs (à gauche) et prix du maïs (à droite) aux États-Unis**



Source : U.S. Department of Agriculture,
<http://www.ers.usda.gov/data/feedgrains/FeedGrainsQueryable.aspx>

La demande de matières de base pour la production d'éthanol a largement dépassé les prévisions. Les services des recherches économiques du Ministère de l'Agriculture américain signalent que la surface agricole utilisée pour le maïs en 2007 a augmenté de 11 pour cent, atteignant 87 millions d'hectares. Pas plus de deux ans auparavant, l'estimation la plus *optimiste* de la surface cultivée pour 2008 était inférieure à ce total. Nombre de prévisions récentes sur la production d'éthanol aux États-Unis indiquent que la production devrait *doubler* dans les quatre à six ans à venir. Les prévisions du Ministère de l'Agriculture américain illustrent un scénario classique.

Le maïs utilisé pour produire l'éthanol aux États-Unis continuera à voir sa production augmenter jusqu'en 2009-2010, après quoi on enregistrera une croissance plus lente dans les années à suivre. D'ici la fin des projections, la production d'éthanol dépassera les 12 milliards de gallons par an et utilisera plus de 4.3 milliards de boisseaux de maïs. La forte croissance de la production d'éthanol prévue reflète les dispositions de la Loi sur la politique énergétique de 2005 (« *Energy Policy Act* » ou

EPACT 2005), l'abandon de l'utilisation des MTBE en tant qu'additifs de l'essence, la construction continue d'installations de production d'éthanol et les incitations économiques découlant de la hausse continue des prix du pétrole (U.S. *Department of Agriculture* 2007).

Ces prévisions dépassent nettement les niveaux fixés à 7.5 millions de gallons d'ici 2012, comme le prévoit la norme sur les carburants et combustibles renouvelables, ou *Renewable Fuels Standard (RFS)*, intégrée à l'*Energy Policy Act* de 2005. Ce dépassement prévu des objectifs indique que la combinaison entre les prévisions des futurs prix du pétrole et les exigences en matière de composés oxygénés est le principal moteur de croissance.

Il est peu probable que la croissance de la production à partir des technologies actuelles de production de l'éthanol se poursuive à un rythme aussi soutenu sur le long terme, étant donné les innovations rapides concernant des biocarburants possédant des propriétés supérieures ainsi que les inquiétudes très sérieuses quant aux répercussions sur les coûts et l'environnement de la production actuelle de matières de base pour les biocarburants (Biofuelwatch, 2007). Il est difficile de prévoir avec précision la façon dont évolueront les marchés des biocarburants après 2010. Un cadre d'évaluation de la production potentielle de biocarburants, des effets sur les émissions de gaz à effet de serre, de la modification de l'utilisation des sols et des incidences socio-économiques sera nécessaire pour procéder à l'analyse coûts-avantages de la vaste panoplie de stratégies qui seront proposées et examinées dans le domaine des biocarburants dans les années à venir.

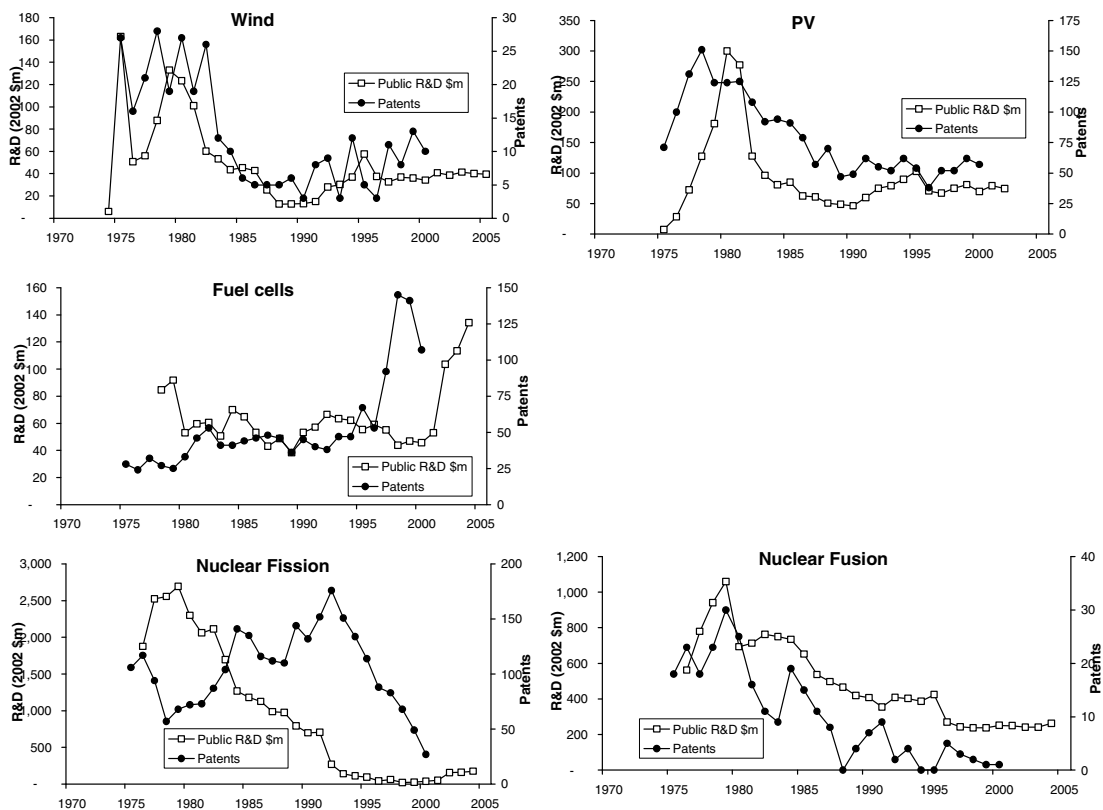
Durant ces dernières années, un ensemble de mécanismes de financement visant à faire progresser la science et à concevoir des technologies en mesure de produire un effet significatif sur les matières de base pour les biocarburants ainsi que sur les filières de production disponibles sur le marché s'est dégagé. Ces nouveaux investissements sont remarquables sous différents points de vue. Premièrement, ils comportent un engagement de fonds considérables – de l'ordre de plusieurs centaines de millions d'USD – qui dépasse de loin les programmes précédents. Deuxièmement, chaque investisseur s'engage dans un programme à long terme – les financements prévoient un horizon temporel de l'ordre de 5 à 10 ans. Troisièmement, ces dépenses sont engagées tant par le secteur public que privé. En outre, s'agissant des acteurs chargés de la mise en œuvre de la recherche, il est capital que les parties concernées par chaque initiative établissent des relations avec les différentes universités, les laboratoires publics, ainsi que les entreprises mûres ou nouvellement créées. La participation de cet ensemble diversifié d'acteurs offre des possibilités favorables, car elle permet de surmonter les obstacles au transfert de connaissances techniques dans le processus d'innovation, depuis la phase de la recherche préliminaire jusqu'à la commercialisation des produits.

6. LES BÉNÉFICES DE LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT : EXEMPLES D'INITIATIVES PRÉCÉDENTES

Les initiatives de ce type, et les autres actions qui existent ou qui naîtront à l'échelon mondial, offrent un potentiel considérable pour réaliser des innovations importantes, prometteuses et probablement stimulantes dans toute la filière de production, depuis la conception des cultures en laboratoire jusqu'à l'agronomie, la gestion des matières de base, la production de carburant et la conception des installations. La Figure 7 présente l'historique des dépenses en matière de recherche et développement pendant les 40 dernières années ainsi que la quantité de brevets déposés dans cinq

secteurs énergétiques (Kammen et Nemet, 2005). Dans quatre de ces secteurs, financements et dépôt de brevets sont étroitement liés, tandis que dans le cinquième secteur, à savoir celui de la fission nucléaire, la relation existe, mais le moratoire sur la construction de nouveaux réacteurs aux États-Unis a probablement entraîné certaines distorsions dans l'évolution technologique dans ce domaine.

Figure 7. Le nombre de brevets offre une mesure des résultats du processus d'innovation. Les chiffres sur les brevets déposés et délivrés aux États-Unis sont utilisés ici pour illustrer l'intensité des activités dans le domaine de l'innovation et indiquent de fortes correspondances entre la R-D du secteur public et le dépôt de brevets dans un ensemble diversifié de technologies énergétiques. Depuis le début des années 80, ces trois indicateurs – à savoir la R-D dans le secteur public, la R-D dans le secteur privé et le dépôt de brevets – affichent des tendances négatives marquées. Les données concernent uniquement les brevets américains délivrés à des inventeurs américains. Les brevets sont datés suivant l'année où ils sont déposés, afin d'éliminer les effets du retard entre le dépôt et l'approbation (source : Margolis et Kammen, 1999 ; Kammen et Nemet, 2005 ; Nemet et Kammen, 2007).



L'intérêt croissant récemment suscité par le secteur des biocarburants – notamment les augmentations spectaculaires de la production d'éthanol (Farrel *et al.*, 2006) – ainsi que l'intérêt considérable du secteur privé pour une gamme diversifiée de biocarburants, requiert une analyse analogue à celle de la Figure 7 dans le domaine des biocarburants. Les études réalisées précédemment (par exemple Evenson et Waggoner, 1979) ont montré qu'il existait une relation étroite entre les

initiatives – qu'il s'agisse de financement ou de nouveaux créneaux de marché – et l'innovation dans le secteur des biocarburants. Contrairement aux conclusions de nos travaux précédents sur l'énergie, qui indiquent qu'il existe seulement quelques possibilités de financement dans le secteur public (par exemple le Ministère américain de l'Énergie essentiellement), de multiples sources de financements peuvent être disponibles pour la recherche sur les biocarburants ou les bioproduits, et cette observation marque, selon nous, un premier passage, qui n'est cependant pas encore adapté à une action politique des pouvoirs publics, contrairement au cas examiné dans nos travaux précédents (Margolis et Kammen, 1999 ; Kammen et Nemet, 2005). Nous nous proposons de commencer l'évaluation à partir de ce stade et d'examiner les autres sources de financement possibles pour l'avenir, l'utilisation des aides financières pour le dépôt et l'application des brevets, afin de brosser un tableau précis des conséquences que pourraient laisser prévoir des augmentations spectaculaires de la production et de l'utilisation des biocarburants.

À titre d'exemple d'initiative financée par le secteur privé, l'université de Californie (Berkeley), en consortium avec le *Lawrence Berkeley National Laboratory* et l'Université de l'Illinois à Urbana Champaign, a créé un institut consacré aux biosciences de l'énergie, l'*Energy Biosciences Institute* (EBI) (<http://www.ebiweb.org/>). L'EBI a reçu de BP un financement de 500 millions USD sur une durée de dix ans et prévoit de concentrer ses activités sur l'analyse d'une vaste gamme de biocarburants et de filières de production ; le *Miscanthus Giganticus* (herbe à éléphant), plante en C4 à pousse rapide, est considéré à cet égard comme une culture prometteuse pour une première observation.

Dans le secteur public, le Ministère de l'Énergie américain a engagé 357 millions USD sur cinq ans pour mettre en place trois centres de recherche sur la bioénergie. Établis au *Lawrence Berkeley National Laboratory*, à l'*Oak Ridge National Laboratory* et à l'Université du Wisconsin, ces centres se consacreront à la recherche sur l'éthanol cellulosique et sur d'autres biocarburants dans le cadre de l'objectif national visant à réduire la consommation américaine d'essence de 20 pour cent d'ici les dix prochaines années.

Au sein de ce groupe, le *Joint Bioenergy Institute* (JBEI) du *Lawrence Berkeley National Laboratory* (<http://jbei.lbl.gov>) focalisera ses activités scientifiques principales sur trois domaines clés : la production de matières de base, la décomposition des matières lignocellulosiques en monomères utilisables et la synthèse des carburants. Le JBEI s'appuiera sur une stratégie opportuniste d'entreprise « *start-up* », en partenariat avec le secteur industriel, pour mettre au point de nouvelles sciences et technologies touchant aux étapes les plus délicates de la transformation industrielle de la bioénergie. Les technologies transversales de l'informatique, des systèmes et de la biologie de synthèse ainsi que les techniques d'imagerie avancée seront appliquées dans le cadre d'une approche à plusieurs niveaux pour la recherche de procédés de conversion de la biomasse en biocarburant, en parallèle avec les avantages déterminés par la découverte dans le domaine de la recherche sur le biohydrogène, l'utilisation de l'énergie solaire pour la production de carburant et les projets plus généraux du Ministère de l'Énergie.

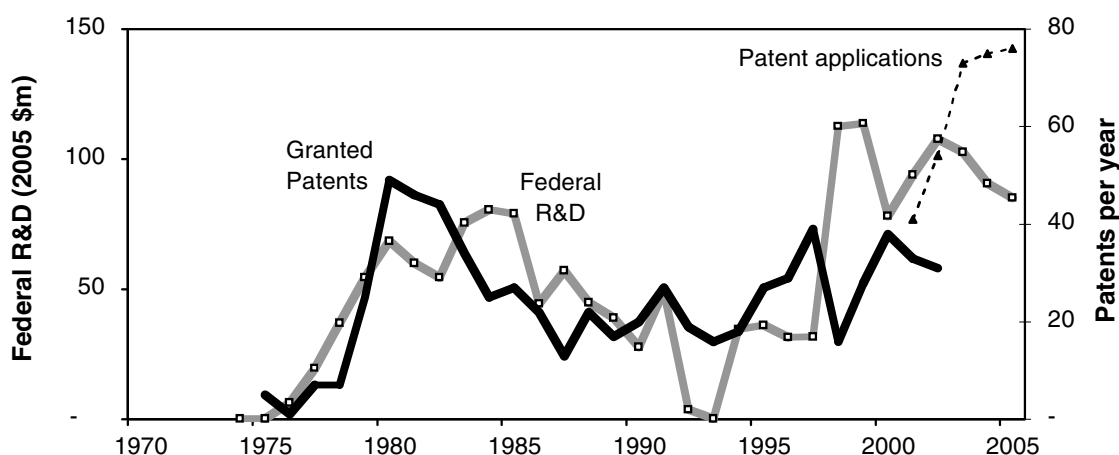
La branche du capital à risque, qui prévoit traditionnellement un rendement financier après trois à sept ans, a récemment commencé à investir lourdement dans les entreprises de biocarburants. Globalement, ce secteur a investi plus de 800 millions USD dans les entreprises de biocarburants en 2006, contre seulement 20 millions USD en 2005 et moins d'un million USD en 2004 (Makower and Pernick, *et al.*, 2007).

Ce type d'investissement présente un potentiel élevé pour la réalisation d'innovations importantes dans l'ensemble de la filière, depuis la conception des cultures en laboratoire jusqu'à l'agronomie des biocarburants, la gestion des matières de base, la production de carburant et la conception des installations.

Ces investissements massifs, à long terme et participatifs sont encourageants, mais ils ne représentent encore qu'un facteur du processus d'innovation. En fin de compte, les avantages pour le secteur agricole offerts par l'amélioration des biocarburants, la qualité de l'environnement et la réduction des importations de pétrole dépendront de l'efficacité des résultats produits par ces actions. Les études réalisées précédemment (par exemple Evenson et Waggoner, 1979) ont observé l'existence d'une relation étroite entre les initiatives – qu'il s'agisse de financement ou de nouveaux créneaux de marché – et l'innovation dans la branche des biocarburants. Dans le même esprit, d'autres travaux ont indiqué une forte relation entre les investissements de R-D et l'innovation, selon les mesures fournies par l'activité de dépôt de brevets (Margolis et Kammen 1999 ; Kammen et Nemet 2005). Étant donné la variété des nouvelles sources de financement apparues au cours des douze derniers mois seulement et la gamme des dispositifs et processus concernés par la production des biocarburants et décrits ci-dessus, la mesure est moins nette. Il n'est resté pas moins qu'à première vue, la relation entre investissements et production de biocarburants semble bien établie sur les trois dernières décennies. Comparons l'activité relative aux brevets dans le domaine de la bio-énergie³ et les investissements de R-D à l'échelon fédéral (Figure 8). Alors que l'on observe une volatilité d'année en année de l'activité de dépôt de brevets, la tendance générale de cette activité semble fortement corrélée aux dépenses de R-D à l'échelon fédéral. Cette analyse constitue une évaluation préliminaire. Par la suite, nous examinerons le plus vaste éventail des sources de financement qui ne se sont dégagées que récemment ainsi que les caractéristiques des modalités d'utilisation de ces sources et la façon dont les résultats sont brevetés, afin de dresser un tableau précis de la situation que pourraient laisser prévoir des augmentations spectaculaires dans la production et l'utilisation des biocarburants.

Un certain nombre de nouvelles cultures, notamment le panic érigé, le cèdre, le saule et d'autres espèces d'arbres à pousse rapide, ainsi que les résidus urbains solides et les algues sont actuellement étudiés et proposés comme matières de base potentielles pour les biocarburants. En outre, une vaste gamme de combustibles de production est envisagée parallèlement aux exemples habituellement cités du biodiesel et des mélanges essence-éthanol. Dans ce domaine de recherche et développement en rapide évolution, il est impératif de disposer d'un ensemble d'instruments pour évaluer le rendement potentiel des investissements dans la recherche ainsi que les avantages énergétiques et les effets sur les émissions de gaz à effet de serre des nouveaux combustibles.

Figure 8. Évaluation préliminaire des brevets américains et des dépenses de R-D à l'échelon fédéral dans le domaine de la bio-énergie. La ligne noire continue indique le nombre de brevets délivrés selon l'année où ils ont été déposés (axe de droite). La ligne noire pointillée indique les demandes de brevets récentes (axe de droite). La ligne grise indique les dépenses de R-D (axe de gauche). Alors que le nombre de catégories de recherche est nettement plus élevé dans les brevets du secteur agricole que dans ceux de l'énergie, nous avons concentré nos recherches de dépôts de brevets sur des chaînes de recherche portant sur l'association entre matières de base et carburants. En utilisant comme source de données la base de données bibliographique de l'U.S. *Patent and Trademark Office*, bureau américain des brevets et des marques de commerce (www.uspto.gov), nous avons lancé des recherches dans les résumés des brevets délivrés en saisissant les mots clés suivants : « biocarburants », « biodiesel », « gazéification de la biomasse », « énergie de la biomasse », « éthanol pour la production d'énergie », « éthanol cellulosique » (Nemet 2007 ; Nemet et Kammen, 2007 ; Nemet et Kammen, 2007a).



7. CONCLUSION

Le premier aspect caractérisant l'économie actuelle des biocarburants, mais aussi le plus évident et le plus décisif, est qu'elle est en plein mouvement et en évolution rapide. L'existence et la nature de l'industrie mondiale des biocarburants sont résolument la conséquence d'interventions des pouvoirs publics motivées et largement justifiées comme instruments de soutien à l'agriculture, mais s'accompagnent d'une préoccupation croissante concernant les effets environnementaux. Ces forces ne sont pas nécessairement conciliables. Si cette situation persiste, on assistera probablement à une montée des tensions entre les différentes politiques et à l'amplification des problèmes liés à l'évaluation des biocarburants par rapport aux autres formes d'énergie et à l'existence des biocarburants eux-mêmes, étant donné qu'ils ont une incidence sur l'utilisation des sols, sur les réserves de terres pour la nature et sur les moyens d'existence des pauvres.

Pour résoudre le conflit entre politiques, idées, analyses économiques et objectifs environnementaux, un ensemble de méthodologies d'évaluation précises ainsi qu'une accessibilité ouverte et de qualité aux données seront nécessaires. La première étape fondamentale est la conception, l'accès public et l'instauration d'un dialogue sur les modèles et les instruments utilisés pour évaluer les impacts, les coûts et les avantages des biocarburants. Sur le plan méthodologique, plusieurs approches existent désormais pour examiner la teneur énergétique et l'effet sur les émissions de gaz à effet de serre des biocarburants. Ces approches sont déjà en train de devenir des instruments stratégiques à travers l'élaboration de normes sur les carburants à faible teneur en carbone et les combustibles renouvelables obligatoires (quotas). La prochaine étape déterminante consiste à faire évoluer les modèles, afin qu'ils reflètent, non seulement la viabilité du carbone, mais aussi la durabilité écologique et culturelle pour les pays riches et pauvres et les collectivités.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de subventions accordées par l'*Energy Foundation* (à DMK et AEF), la *National Science Foundation* (à RJP), l'*U. S. Environmental Protection Agency* (à ADJ), la « *Class of 1935 of the University of California* (à DMK), Berkeley, et le *Renewable and Appropriate Energy Laboratory* soutenu par la *Karsten Family Foundation* (à DMK).

NOTES

1. Dans le contexte de l'ACV des biocarburants, la méthode fondée sur le remplacement a tout d'abord été structurée et appliquée par Delucchi (1991, 1993), puis elle a été utilisée de façon plus approfondie par Graboski (2002) et Kim et Dale (2002).
2. Dans cet ordre d'idées, Marland et Schlamadinger (1995) font remarquer que les systèmes de production de biocarburant exigent l'engagement de ressources considérables (terre) et qu'une évaluation des émissions de gaz à effet de serre devrait prendre en compte d'autres possibilités d'utilisation des terres pour minimiser les émissions nettes de gaz à effet de serre (p. 1136).
3. Notre définition de la « bioénergie » englobe l'utilisation de matériel biologique pour la production d'électricité et de carburants pour le transport. Les termes utilisés pour les recherches sur les brevets reflètent cette définition.

RÉFÉRENCES

Arons, S. R., Brandt, A. R., Delucchi, M., Eggert, A., Farrell, A. E., Haya, B. , Hughes, J., Jenkins, B., Jones, A. D., Kammen, D. M., Knittel, C. R., Lemoine, D. M., Martin, E. W., Melaina, M., Ogden, J. M., Plevin, R., Sperling, D., Turner, B. T., Williams, R. B. et Yang, C. (2007) *A Low-Carbon Fuel Standard for California Part 1: Technical Analysis* (Office of the Governor / Air Resources Board).

Biofuelwatch (2007) "Open Letter: We call on the EU to abandon targets for biofuel use in Europe". 14 <http://www.biofuelwatch.org.uk/2007Jan31-openletterbiofuels.pdf>.

BP (2007) "Statistical Review Of World Energy". The British Petroleum Company, plc, www.bp.com.

A. R. Brandt, A. Eggert, A. E. Farrell, B. K. Haya, J. Hughes, B. Jenkins, A. D. Jones, D. M. Kammen, C. R. Knittel, M. Melaina, M. O'Hare, R. Plevin, D. Sperling (2007) *A Low-Carbon Fuel Standard for California Part 2: Policy Analysis* (Office of the Governor/Air Resources Board).

Brandt, A. R. et A. E. Farrell (2007). "Scraping the bottom of the barrel: CO₂ emissions consequences of a transition to low-quality and synthetic petroleum resources". Climatic Change, à paraître.

W. G. Colella, M. Z. Jacobson, D. M. Golden (2005) "Switching to a U. S. Hydrogen Fuel Cell Vehicle Fleet: the Resultant Change in Emissions, Energy Use, and Greenhouse Gases". Journal of Power Sources 150: 150-181.

CONCAWE, EUCAR (European Council for Automotive Research and Development), ECJRC (European Commission Joint Research Centre) (2004). *Well-To-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, Well-to-Wheels Report, Version 1b, January. Available on the web at <http://ies.jrc.cec.eu.int/Download/eh>. Version 2b, Mise à jour de mai 2006 accessible à: <http://ies.jrc.cec.eu.int/wtw.html>.

Delucchi, M. A. (2003). *A Lifecycle Emissions Model (LEM): Lifecycle Emissions from Transportation Fuels, Motor Vehicles, Transportation Modes, Electricity Use, Heating and Cooking Fuels, and Materials*, UCD-ITS-RR-03-17, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, décembre. www.its.ucdavis.edu/people/faculty/delucchi.

Delucchi, M. A. (2003a). *Appendix D: CO₂ Equivalency Factors*. UCD-ITS-RR-03-17D, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, décembre. www.its.ucdavis.edu/people/faculty/delucchi.

Delucchi, M. A. (2004). *Conceptual and Methodological Issues in Lifecycle Analyses of Transportation Fuels*. Institute of Transportation Studies. Davis, University of California: 25.

Fuels and Motor Vehicles. UC Davis Institute of Transportation Studies, 199 www.its.ucdavis.edu/people/faculty/delucchi/.

Delucchi, M. A. (2006). *"Lifecycle Analysis of Biofuels"*. Report UCD-ITS-RR-06-08. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. Mai. www.its.ucdavis.edu/people/faculty/delucchi.

Deluchi, M. A. (1991). *Emissions of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity*, ANL/ESD/TM-22, Volume 1, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, novembre.

Deluchi, M. A. (1993). *Emissions of Greenhouse Gases from the Use of Transportation Fuels and Electricity*, ANL/ESD/TM-22, Volume 2, Appendices A-S, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, novembre. http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=10119540.

Demirbas, A. (2007). *"Progress and recent trends in biofuels"*. Progress in Energy and Combustion Science 33(1): 1-18.

Dias de Oliveira, M. E., B. E. Vaughan, *et al.* (2005). *"Ethanol as fuels: Energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint"*. Bioscience 55(7): 593-602.

EPRI (2002) *"Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles"*. EPRI, 86 http://www.evworld.com/library/EPRI_sedan_options.pdf.

Farrell A. E., Plevin, R. J. Turner, B. T., Jones, A. D. O'Hare, M. et Kammen, D. M. (2006) *"Ethanol can contribute to energy and environmental goals"*, Science, 311, 506 – 508.

Feddema, J. J., K. W. Oleson, *et al.* (2005). *"The importance of land-cover change in simulating future climates"*. Science 310(5754): 1674-1678.

Food and Agricultural Policy Research Institute (2005) *"Implications of Increased Ethanol Production for U.S. Agriculture"*. University of Missouri, 28.

Graboski, M. (2002) *"Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Ethanol"*. National Corn Growers Association, 108 www.ncga.com/ethanol/pdfs/energy_balance_report_final_R1.PDF.

Gray, K. A. (2007). *"Cellulosic ethanol - state of the technology"*. International Sugar Journal 109(1299): 145.

Jones, C. M., Kammen, D. M. et Horvath, A. (2007) *"Driving Sustainable Consumption through Environmental Accounting of Retail Goods and Services"*. Environmental Science & Technology, en cours de révision.

Hendrickson, C. T., L. B. Lave, H. S. Matthews, *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach* (Resources for the Future Press, Washington, D.C., 2006).

Houghton, R. A. (1999). *"The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990*"*. Tellus_B 51(2): 298-313.

Houghton, R. A. et J. L. Hackler, *Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850 to 1990*, ORNL/CDIAC-131, NDP-050/R1, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee (2001). <http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp050/ndp050.pdf>.

International Standards Organization (2006) "*ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*". International Standards Organization.

Kalogo, Y., S. Habibi, *et al.* (2006). "*Environmental Implications of Municipal Solid Waste-Derived Ethanol*". Environ. Science Technology (ES&T).

Kammen, D. M. (2007) "*Transportation's Next Big Thing is Already Here*", May, GreenBiz.com, Climate Wise. URL: http://www.greenbiz.com/news/columns_third.cfm?NewsID=35189.

Kammen, D. M. et G. F. Nemet (2005). "*Reversing the Incredible Shrinking Energy R&D Budget*". Issues In Science and Technology Fall: 84-88.

Kilman, S. (2006). *DuPont-BP Venture Will Make Competing Product to Ethanol*. Wall Street Journal. New York City: A2.

Kim, S. et B. Dale (2002). "*Allocation procedure in ethanol production system from corn grain*". International Journal of Life Cycle Assessment 7(4): 237-243.

Kløverpris, J., H. Wenzel, et P. H. Nielsen, "*Life Cycle Inventory Modelling of Land Use Induced by Crop Consumption*", submitted to the International Journal of Life Cycle Assessment, Mars (2007). www.scientificjournals.com/sj/lca/Abstract/ArtikelId/9080.

Lewandowski, I. et U. Schmidt (2006). "*Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach*". Agriculture Ecosystems & Environment 112(4): 335-346.

Lotero, E., Y. J. Liu, *et al.* (2005). "*Synthesis of biodiesel via acid catalysis*". *Industrial & Engineering Chemistry Research* 44(14): 5353-5363.

Makower, J., R. Pernick, *et al.*, (2007). *Clean Energy Trends 2007*, Clean Edge, Inc. and Nth Power LLC.

Margolis, R. M. et D. M. Kammen (1999). "*Underinvestment: The energy technology and R&D policy challenge*". Science 285: 690-692.

Marland, G., R. A. Pielke, *et al.* (2003). "*The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy*". Climate Policy 3(2): 149-157.

G. Marland et B. Schlamadinger (1995). "*Biomass Fuels and Forest-Management Strategies: How Do We Calculate the Greenhouse-Gas Emissions Benefits?*". Energy 20: 1131-1140.

Mathews, J. A. (2007). "*Biofuels: What a Biopact between North and South could achieve*". Energy Policy, in press.

Matthews, H. S. et M. J. Small (2001). "*Extending the Boundaries of Life-Cycle Assessment Through Environmental Economic Input-Output Models*". *Journal of Industrial Ecology* 4: 7-10.

Menon, S., J. Hansen, *et al.* (2002). "*Climate effects of black carbon aerosols in China and India*". *Science* 297(5590): 2250-2253.

Mohan, D., C. U. Pittman, *et al.* (2006). "*Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review*". *Energy & Fuels* 20(3): 848-889.

Nemet, G. F. (2007). *Policy and Innovation in Low-Carbon Energy Technologies*. Energy and Resources Group. Berkeley, University of California. Ph.D.: 249.

Nemet, G. F. et D. M. Kammen (2007). "*U.S. energy research and development: Declining investment, increasing need, and the feasibility of expansion*". *Energy Policy* 35(1): 746-755.

Nemet, G. F. et Kammen (2007a) "*Are we entering a new phase of energy research?*", en préparation.

Patzek, T. (2004). "*Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle*". *Critical Reviews in Plant Sciences* 23(6): 519-567.

Pennington, D. W., J. Potting, *et al.* (2004). "*Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice*". *Environment International* 30(5): 721-739.

Pimentel, D. et T. Patzek (2005). "*Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower*". *Natural Resources Research* 14(1): 65-76.

Rebitzer, G., T. Ekvall, *et al.* (2004). "*Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*". *Environment International* 30(5): 701-720.

Schimel, D. S., J. I. House, *et al.* (2001). "Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems." *Nature* 414(6860): 169-172.

Shapouri, H., J. A. Duffield, *et al.* (2004). *The 2001 Net Energy Balance of Corn-Ethanol*. Corn Utilization and Technology Conference, Indianapolis.

Stephanopoulos, G. (2007). "*Challenges in engineering microbes for biofuels production*". *Science* 315(5813): 801-804.

Tilman, D. A., J. Hill, *et al.* (2006). "*Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass*". *Science* 314: 1598-1600.

Turner, B. T., R. J. Plevin, *et al.* (2007) "*Creating Markets for Green Biofuels*". University of California, 62 <http://repositories.cdlib.org/its/tsrc/UCB-ITS-TSRC-RR-2007-1/>.

U.S. Department of Agriculture (2007) "*USDA Agricultural Projections to 2016*". Economic Research Service, 110
http://www.usda.gov/oce/commodity/archive_projections/USDA%20Agricultural%20Projections%20to%202016.pdf.

Wang, M. (2001) "*Development and Use of GREET 1.6 Fuel-Cycle Model for Transportation Fuels and Vehicle Technologies*". Argonne National Laboratory, Center for Transportation Research, 218 <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/1>.

LISTE DES PARTICIPANTS

Ms Lyn MARTIN Senior Economist Bureau of Transport and Regional Economics (BTRE) Dept of Transport & Regional Services 111 Alinga Street AUS-CANBERRA, ACT 2601 Australie	Présidente
Prof. Birgitte K. AHRING Head of Bio Science and Technology BioCentrum-DTU, Building 227 Technical University of Denmark DK-2800 LYNGBY Denmark	Rapporteur
Prof. Edmar de ALMEIDA University of Rio de Janeiro Grupo de Economia da Energia Instituto de Economia – UFRJ RIO DE JANEIRO Brésil	Rapporteur
Mr. R. STEENBLIK Research Director Global Subsidies Initiative (GSI) International Institute for Sustainable Development (IISD) 28 rue Fremicourt F-75015 PARIS France	Rapporteur
Prof. Dan KAMMEN University of California at Berkeley Goldman School of Public Policy 310 Barrows Hall #3050 BERKELEY, CA 94720-3050 USA	Rapporteur

Rapporteur

Dr. Jeremy WOODS
Research Fellow in Energy Policy
Centre for Environmental Policy
Bioenergy Group
Faculty of Natural Sciences
Imperial College London
Exhibition Road, South Kensington
GB-LONDON SW7 2AZ
United Kingdom

M. le Professeur Michel BEUTHE
Facultés Universitaires Catholiques de Mons (FUCAM)
Groupe Transport et Mobilité (GTM)
151 Chemin de Binche
B-7000 MONS
Belgique

Professor Abigail BRISTOW
Transport Studies Group
Department of Civil and Building Engineering
Loughborough University
LOUGHBOROUGH,
Leicestershire, LE11 3TU
United Kingdom

Dr. Imre BUKI
Energy Division
KTI Institute for Transport Sciences
Than Karoly ut. 3-5
PO Box 107
H-1518 BUDAPEST
Hongrie

Mr. Pierpaolo CAZZOLA
Energy Technology Analyst
IEA
9 rue de la Fédération
F-75739 PARIS CEDEX 15
France

Ms. Jessica CHALMERS
Programme Manager
Low Carbon Vehicle Partnership (LCVP)
17 Queen Anne's Gate
LONDON SW1H 9BU
United Kingdom

M. Bernard CRISTOFINI
Chargé de mission Prospective et Stratégie Internationale
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)
DADP
147, rue de l'Université
F-75338 Paris CEDEX 0
France

M. Jean-Francois DALLEMAND
Joint Research Centre
European Commission
Institute for Environment and Sustainability
Renewable Energies Unit
TP 450 21020 Ispra (Va)
Italy

Dr. Bart DEHUE
Ecofys bv
P.O. Box 8408
NL-3503 RK UTRECHT
Kanaalweg 16-G
NL-3526 KL UTRECHT
The Netherlands

Dr. Mark A. DELUCCHI
Research Scientist
Institute of Transportation Studies
UC Davis
5029 Vista del Oro Way
Fair Oaks, CA 95628
USA

Dr. Robert EDWARDS
European Commission
DG - Joint Research Center, Ispra
Institute for Environment and Sustainability
Renewable Energies Unit
Via E. Fermi 1
I-21020 ISPRA (VA)
Italy

Asst. Prof. Alex FARRELL
Energy and Resources Group (ERG)
University of California at Berkeley
310 Barrows Hall
Berkeley, CA 94720-3050
USA

Mr. Axel FRIEDRICH
Umweltbundesamt (UBA)
Postfach 33 00 22
Bismarckplatz 1
D-14191 BERLIN
Allemagne

M. Jean-François GRUSON
Adjoint au directeur des études économiques
Institut Français du Pétrole (IFP)
BP 311
F-92508 RUEIL-MALMAISON Cedex
France

Dr. Lukas GUTZWILLER
Swiss Federal Office of Energy
Division Energy Policy
CH-3003 BERNE
Switzerland

Mrs. Janet HALL
Senior Policy Adviser
United Nations Foundation
1800 Massachusetts Avenue NW, Suite 400
Washington DC 20036
ETATS-UNIS

Mr. I. HODGSON
DG ENV.C.3
Unit 3, Clean Air and Transport
CE/EC
200 rue de la Loi
B-1049 BRUXELLES
Belgique

Mr. Doug KOPLow
President
Earth Track, Inc.
2067 Massachusetts Avenue, 4th Floor
Cambridge, MA 02140
USA

Mme Géraldine KUTAS
Groupe d'Economie Mondiale (GEM)
Fondation Nationale des Sciences Politiques (Sciences Po)
56 rue des Saints Pères
75006 PARIS
France

Mr. Brice LALONDE
(replaced by Mr. Richard Doornbosh, Principal adviser, Thurs. a.m.)
Chair
Round Table on Sustainable Development
OECD
2 rue André Pascal
75775 PARIS CEDEX 16
France

Mr. Richard DOORNBOSCH
Principal Adviser
Round Table on Sustainable Development
OECD
2 rue André Pascal
75775 PARIS CEDEX 16
France

Mr. Lew FULTON
Task Manager
United Nations Environment Programme (UNEP)
GEF Climate Change Division
United Nations Avenue, Gigiri
PO Box 30552, 00100
NAIROBI
Kenya

Mr. Martin von LAMPE
Directorate for Trade and Agriculture
OECD
2 rue André Pascal
75775 PARIS CEDEX 16
France

M. Jean-François LARIVÉ
CONCAWE
Bld. du Souverain 165
B-1160 BRUSSELS
Belgium

Mr. John NEEFT
Senter Novem
Catharijnesingel 59
P.O. Box 8242
NL-3503 RE UTRECHT
The Netherlands

Mlle. Charlotte OPAL
Coordinatrice
Round Table on Sustainable Biofuels
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
CDM CGSE
ODY 318, Station 5
CH-1015 LAUSANNE
Switzerland

Mme Martina OTTO
Energy Branch
United Nations Environment Programme
Tour Mirabeau, 39 - 43 Quai André Citroën
75739 Paris - Cedex 15
France

Dr Tadeusz PATZEK
University of California at Berkeley
Civil and Environmental Engineering
425 Davis Hall
BERKELEY, CA 94720-1710
Etats-Unis

Dr. Adriaan PERRELS
Principal Economist
VATT (Government Institute for Economic Research)
Arkadiankatu 7,
P.O. Box 1279,
FI-00101 HELSINKI
Finlande

M. Charles RAUX
Directeur
Laboratoire d'Economie des Transports (LET)
14 avenue Berthelot
F-69363 LYON Cedex 07
France

Dr. Guido REINHARDT
Scientific Director
IFEU Institute for Energy and
Environmental Research
Wilckensstrasse 3
D-69120 HEIDELBERG
Germany

Mr. Ralph SIMS
Renewable Energy Analyst
AIE/IEA
9 rue de la Fédération
F-75739 PARIS CEDEX 15
France

Mr. Petr SMEKAL
Researcher – Environmental Section
Alternative Fuels and Propulsions
Transport Research Centre (CDV)
Lisenska 33a
CZ-636 00 BRNO
République Tchèque

Mr. John STEVENS, CBE
Honorary Fellow
Institute for European Environmental Policy
28 Queen Anne's Gate
GB-LONDON SW1H 9AB
United Kingdom

Mr Philip WATSON
E4tech (UK) Ltd
83 Victoria Street
GB-LONDON SW1H 0HW
United Kingdom

Dr. Rainer ZAH
Deputy Head of Technology and Society
EMPA (Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt)
Lerchenfeldstr. 5
CH-9014 ST. GALLEN
Suisse

Observers :

Mr. Mark FRICKEL
Consultant
International Institute for Sustainable Development (IISD)
International Environment House 2
9 chemin de Balexert
Châtelaine
CH-1219 GENEVA
Switzerland

Ms. Emilie PONS
Trade and Agriculture Directorate
Agro Food Trade and Markets
OECD
2, rue Andre-Pascal
F-75775 PARIS CEDEX 16
France

M. Alexandre BIAU
Bureau des Relations Extérieures de l'Union européenne
Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP)
Direction Générale des Politiques Economique,
Européenne et Internationale (DGPEI)
Service des Relations Internationales/Sous- Direction des Affaires
Européennes
3 rue Barbet de Jouy
F-75 349 PARIS 07 SP
France

Mme Mylène TESTUT
Bureau de la biomasse, des biocarburants, des bioénergies et des
biomatériaux
Service de la Production et des marchés
MAP/DGPEI
3 rue Barbet de Jouy
F-75 349 PARIS 07 SP
France

Mr. Henk WARDENAAR
Ministry of Transport, Public Works and Water Management
DGP
P O Box 20901
Plesmanweg 1-6
NL-2500 EX THE HAGUE
The Netherlands

Mrs. Martina BEKE
Attachée
Norwegian Delegation to the OECD
33, rue de Franqueville
F-75116 PARIS
France

Mr. Jean-Jacques BENEZIT
Conseiller économique et agricole
Delegation permanente de la France auprès de l'OCDE
5 rue Oswaldo Cruz
75016 Paris
France

Ms. Katarina ISAKSSON
Swedish Delegation to the OECD
2 rue du Conseiller Collignon
75116 Paris
France

SECRETARIAT FORUM INTERNATIONAL SUR LES TRANSPORTS

Mr. Jack SHORT
Secrétaire Général

Mr. Alain RATHERY
Secrétaire Général Adjoint

CENTRE CONJOINT DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS OCDE/FIT

Mr. Stephen PERKINS
Chef du Centre Conjoint de Recherche sur les Transports

Dr. Michel VIOLLAND
Administrateur
Centre Conjoint de Recherche sur les Transports

Mr. Jari KAUPPILA
Administrateur
Centre Conjoint de Recherche sur les Transports

Mr. Philippe CRIST
Administrateur
Centre Conjoint de Recherche sur les Transports

Mrs. Julie PAILLIEZ
Assistante
Centre Conjoint de Recherche sur les Transports

Mlle Françoise ROULLET
Assistante
Centre Conjoint de Recherche sur les Transports

ÉGALEMENT DISPONIBLES

Systèmes nationaux de planification des infrastructures de transport. Série CEMT – Table Ronde 128ème (2005)

(75 2005 10 2 P) ISBN 92-821-2343-X

L'offre de transports : les limites de la (dé)réglementation. Série CEMT – Table Ronde 129ème (2006)

(75 2006 02 2 P) ISBN 92-821-2347-2

Transport et commerce international. Série CEMT – Table Ronde 130ème (2006)

(75 2006 13 2 P1) ISBN 92-821-1340-X

Les transports et la décentralisation. Série CEMT – Table Ronde 131ème (2006)

(75 2006 12 2 P1) ISBN 92-821-1344-2

Investissements en infrastructures de transport et productivité de l'économie. Série CEMT – Table Ronde 132ème (2007)

(74 2007 04 2 P1) ISBN 978-92-821-0126-1

La (dé)réglementation du secteur des taxis. Série CEMT – Table Ronde 133ème (2007)

(74 2007 02 2 P1) ISBN 978-92-821-0116-2

Accès au marché, commerce des services de transport et facilitation des échanges. Série CEMT – Table Ronde 134ème (2007)

(74 2007 05 2 P1) ISBN 978-92-821-0148-3

Tarification des infrastructures de transport et dimensionnement de la capacité : L'autofinancement de l'entretien et de la construction des routes. Série CEMT – Table Ronde 135ème (2007)

(74 2007 01 2 P1) ISBN 978-92-821-0110-0

Estimation et évaluation des coûts de transport. Série CEMT – Table Ronde 136ème (2007)

(74 2007 06 2 P1) ISBN 978-92-821-0153-7

Transport, formes urbaines et croissance économique. Série CEMT – Table Ronde 137ème (2007)

(74 2007 07 2 P1) ISBN 978-92-821-0166-7

Vous pourrez recevoir par email des informations sur les nouvelles publications de l'OCDE en vous inscrivant sur www.oecd.org/OECDdirect

Vous pourrez les commander directement sur www.oecd.org/bookshop

Vous trouverez des informations complémentaires sur la CEMT sur www.cemt.org

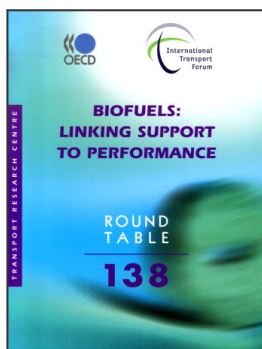
TABLE DES MATIÈRES

SYNTHÈSE DE LA DISCUSSION	7
--	---

RAPPORTS INTRODUCTIFS

Impact énergétique des biocarburants et incidences sur l'effet de serre : Un cadre d'analyse - par D. KAMMEN, A. FARRELL, R. PLEVIN, A. JONES, G. NEMET et M. DELUCCHI (États-Unis)	45
1. Introduction.....	49
2. La production de biocarburant.....	52
3. Effets du changement d'affectation des terres : un cadre préliminaire	62
4. Comparaison des analyses récentes sur les biocarburants	65
5. Développement du marché des biocarburants	69
6. Les bénéfices de la recherche et développement : Exemples d'initiatives précédentes.....	71
7. Conclusion	75
Aides : Distorsion du bilan économique des biocarburants - par T.R. STEENBLIK (Suisse)	83
1. Introduction.....	87
2. Aperçu du secteur des biocarburants liquides	88
3. Aides publiques aux biocarburants liquides	103
4. Marchés internationaux et obstacles aux échanges	115
5. Implications politiques.....	125
6. Conclusions et recommandations	132
Annexe : Conditions de durabilité de la biomasse élaborées par le Groupe néerlandais pour la biomasse durable	136
Biocarburants durables pour le secteur des transports - par B. AHRING (Danemark) ...	145
1. Introduction.....	149
2. Biocarburants de première ou de deuxième génération.....	149
3. Biocarburants de deuxième génération : Objectifs politiques aux États-Unis et dans l'Union Européenne.....	152
4. Une nouvelle politique s'impose pour promouvoir des biocarburants durables	155
5. Estimations de la production future de biocarburants aux États-Unis et dans l'Union Européenne.....	156
6. Technologie des biocarburants	159
7. Conclusion	161

Performances des biocarburants brésiliens : Analyse économique, environnementale et sociale - par E.F. DE ALMEIDA, J.V. BOMTEMPO et C.M. DE SOUZA E SILVA (Brésil)	163
Introduction	167
1. Performance de l'éthanol brésilien	167
3. Performances du biodiesel brésilien	187
Certification environnementale des biocarburants - par J. WOODS et R. DIAZ-CHAVEZ (Royaume-Uni)	209
1. Introduction	213
2. Contexte et ressources mondiaux	214
3. Systèmes nationaux d'assurance qualité et de certification des biocarburants	220
4. Assurance qualité et certification	223
5. Conclusions	227
LISTE DES PARTICIPANTS.....	233



Extrait de :
Biofuels
Linking Support to Performance

Accéder à cette publication :
<https://doi.org/10.1787/9789282101803-en>

Merci de citer ce chapitre comme suit :

Kammen, Daniel M., *et al.* (2008), « Impact énergétique des biocarburants et incidences sur l'effet de serre : Un cadre d'analyse », dans Forum International des Transports, *Biofuels : Linking Support to Performance*, Éditions OCDE, Paris.

DOI: <https://doi.org/10.1787/9789282101827-3-fr>

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les arguments exprimés ici ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document et toute carte qu'il peut comprendre sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.