



**Conseil Economique
et Social**

Distr.
GENERALE

ECE/TRANS/2008/7
19 décembre 2007

FRANÇAIS
Original: FRANÇAIS ET ANGLAIS
SEULEMENT

COMMISSION ECONOMIQUE POUR L'EUROPE

COMITE DES TRANSPORTS INTERIEURS

Soixante-dixième session
Genève, 19-21 février 2008
Point 10(a)(ii) de l'ordre du jour

TENDANCES ET ECONOMIE DES TRANSPORTS

**Etudes entreprises par d'autres organisations
sur l'économie des transport de le coût des infrastructures**

Note de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OECD)
et la Forum International des Transports (FIT) ^{*/}

Appendice 1: 17ème Symposium International sur l'Économie des Transports et la Politique
25-27 octobre 2006, Berlin

Appendice 2: Table Ronde 139: Biocarburants : lier les politiques de soutien aux
bilans énergétiques et environnementaux
7-8 juin 2007, Paris

^{*/} Le présent document reproduit l'information tel qu'elle a été reçu par le Secrétariat.

Appendice 1

17^{ème} Symposium International sur l'Économie des Transports et la Politique

Berlin, 25-27 Octobre 2006

SYNTHÈSE DES DÉBATS

Du 25 au 27 octobre 2006, le Centre Conjoint OCDE/CEMT de Recherche sur les Transports a organisé à Berlin le 17^{ème} Symposium international sur l'économie des transports et la politique, 17^{ème} d'une série de Symposiums initiée par la CEMT. Plus de 300 personnes ont assistées à ce Symposium dont le thème principal était « Tirer parti de la mondialisation – contribution du secteur des transports et enjeux politiques ». Une vingtaine d'exposés introductifs ont été présentés et un large débat entre les experts du transport, ceux de la mondialisation et l'audience elle-même s'est engagé. Si les thèmes abordés ont couvert un vaste domaine, allant des données disponibles et des tendances discernables, à la problématique des décisions en matière d'infrastructures dans le cadre de la mondialisation, en passant par l'influence de cette dernière sur les politiques régionales et nationales, le présent document se propose de présenter une synthèse des débats articulée autour de deux grands thèmes :

- Le rôle du transport dans le processus de globalisation.
- Les défis pour la politique des transports et les réponses.

Chacun de ces grands thèmes est lui-même structuré autour de quelques points qui s'efforcent de dégager les idées essentielles. A partir de ces différentes questions, le Symposium a permis de faire le point sur des thématiques de recherche qui avaient animé le Centre de Recherche OCDE/CEMT sur les Transports au cours des premières années de sa création, qui remonte à 2004.

1. LE RÔLE DU TRANSPORT DANS LE PROCESSUS DE GLOBALISATION

1.1. Transport et productivité de l'économie

Le transport dessine la structure spatiale de nos économies et de nos sociétés en même temps qu'il contribue à en déterminer le niveau de productivité : en effet, le transport permet la

spécialisation des unités de production comme résultat d'un accroissement des aires de marché. Sans transport, il n'existe pas de possibilité pour une entreprise située en Espagne de desservir des clients en Allemagne de même que le processus actuel qui voit la Chine devenir l'atelier de fabrication d'un nombre croissant de biens de première consommation ne serait pas possible.

Pour être plus précis, l'accroissement de l'aire géographique de pertinence d'une entreprise permet à celle-ci de devenir plus productive à la fois pour des questions d'apprentissage, d'économies d'échelle ou d'envergure chaque fois que sa production gagne en quantité sous l'effet de la desserte de nouveaux marchés. Le transport est en effet à l'origine de l'accroissement de la spécialisation des entreprises, vecteur elle-même de gains de productivité à côté de ceux engendrés par le progrès technique. Ce sont les penseurs en économie de l'ère classique tels Adam Smith ou David Ricardo qui ont mis en évidence le rôle moteur des gains de productivité dus à la spécialisation des activités, spécialisation elle-même permise à grande échelle par le transport. Il va de soi que chaque bien étant produit là où les conditions économiques pour ce faire sont les plus avantageuses, l'économie mondiale gagne en prospérité. C'est ainsi qu'avec la multiplication des échanges et l'ouverture au commerce mondial permise par le transport, on assiste à un accroissement de la richesse au sein des économies qui ont su précisément s'insérer dans le commerce mondial.

Le transport est ainsi un facteur de transformation économique et social et l'on pourra également remarquer qu'il joue un rôle important dans le processus d'urbanisation en permettant d'acheminer nourriture et biens au cœur des zones densément peuplées comme les grandes conurbations et en permettant aux personnes de se mouvoir à l'intérieur et pour accéder à ces aires urbaines, ceci pour établir les contacts nécessaires à la prospérité des grandes cités ou encore indispensables au processus d'économies d'agglomération. Ce constat permet de toucher du doigt le fait que toutes les transformations induites par le transport ne sont pas nécessairement positives : ainsi constate-t-on dans les aires urbaines le phénomène de la congestion des infrastructures de transport en même temps qu'un étalement croissant des activités, tous deux à l'origine de nuisances environnementales conséquentes. Il est clair également qu'en mettant en concurrence les activités de différents lieux géographiques avec des conditions économiques et sociales qui ne sont pas nécessairement comparables, le transport est aussi un facteur de transformation sociale qui peut conduire à la destruction du tissu économique traditionnel au fur et à mesure de la montée en puissance industrielle et commerciale de nouvelles zones du globe. Le transport est un vecteur qui porte à distance la capacité en industrie et en innovation d'une économie en même temps qu'il importe et met en concurrence cette même capacité avec celle d'autres économies. Ce facteur est à l'origine de la contestation au sein de certaines sociétés du bienfait de la mondialisation. Si l'économie dans son ensemble est gagnante pour peu que les ressources utilisées le soient à un prix qui correspond à leur rareté, il peut exister des portions de la population durement touchées par ces processus de transformation. Il est clair que si l'économie prise globalement est gagnante, des mécanismes de compensation doivent être mis en place en faveur de ceux qui en sont les perdants.

Une des conséquences particulières de l'impact du transport sur la productivité de l'économie et plus globalement de son impact en terme de transformation des conditions économiques et sociales, est qu'il est difficile d'appréhender dans leur totalité les effets d'une nouvelle infrastructure. L'enjeu est bien lors d'un nouveau projet d'infrastructure d'être capable de cerner tous ces effets et notamment de tenir compte du rôle dynamique du transport sur les conditions économiques. Il y a là un défi qui est lancé à la communauté des chercheurs pour proposer des méthodes qui enrichissent l'analyse coûts-bénéfices traditionnelle de façon à

restituer au transport son rôle de transformation de la productivité du système économique et de façonnage à long terme des processus de production. Le Symposium a particulièrement souligné ce défi.

1.2. Le temps de transport en tant que barrière commerciale

Il est courant en économie industrielle de considérer le prix du transport comme un facteur prépondérant par exemple de choix modal. En fait, une analyse attentive des motifs de choix en matière de transport des industries et activités commerciales montre que les facteurs qualitatifs ou encore les attributs qualitatifs d'une solution « transport » sont au moins aussi prépondérants que son prix. Ceci permet de souligner les résultats d'un domaine de recherche novateur au sujet du commerce international et qui concerne l'importance du temps comme variable permettant d'expliquer les performances à l'exportation d'un pays. Ainsi en Afrique subsaharienne pour les zones enclavées, de la fabrique à un bateau permettant l'exportation des produits, il s'écoule plus de deux mois, réduisant par la même pratiquement à néant la capacité d'exporter. En effet, établir dans ces conditions un flux continu d'exportations permettant de suppléer à deux mois de latence aurait un coût considérable. En plus, les consommateurs finaux, pour la plupart dans les pays développés, sont devenus impatient et attachent de l'importance à une disposition rapide du bien commandé, d'où la nécessité de procédures de production et de livraison rapides. En plus, les biens sont soumis à des contraintes de modes ou de progrès techniques qui rendent parfois très rapidement obsolètes certains d'entre eux et ceci en nombre grandissant. En plus, les biens gagnent en valeur unitaire, ils incorporent de plus en plus de savoir-faire, rendant leur immobilisation virtuelle pendant le transport encore plus coûteuse. Ceci fait que le temps pris par les opérations de transport par exemple peut devenir une barrière commerciale encore plus dissuasive que des taxes ou tarifs douaniers. C'est en tout cas ce que mettent en évidence les recherches les plus récentes sur les performances à l'exportation de certains pays et qui ont été présentées au cours du Symposium. Encore faut-il parler de performance relative dans la mesure où c'est le temps de transport d'une zone économique par rapport au temps pour un bien similaire d'une autre zone qui exercera un rôle discriminant. On peut y voir une confirmation dans le développement du transport aérien de marchandises qui, s'il a certes enduré une baisse relative de son prix, connaît surtout une progression très importante : ainsi aux États-Unis plus de 40 % du commerce extérieur en valeur est acheminé par ce mode de transport. Le transport aérien permet notamment de tester une présence sur un nouveau marché à l'exportation : par sa rapidité et sa flexibilité, il permet de répondre le cas échéant au succès sur de nouveaux marchés sachant que sauf pour les marques mondialement connues, les réussites à l'exportation sont presque toujours des succès de court terme pour lesquels il importe d'être très réactif.

Pour saisir l'importance que peut avoir le temps de transport sur les performances commerciales à l'exportation, il faut considérer que les petits pays qui n'ont pas une base industrielle pleinement développée, ont une part très importante d'importations de biens qui entrent dans la composition des produits transformés et réexportés, ce qui fait que le temps apparaît ainsi être une friction qui compte doublement : elle joue tant à l'importation qu'à l'exportation.

1.3. Du transport à la logistique

La logistique qui recouvre une réalité multiforme assure la connexion entre le transport et le commerce, particulièrement international : c'est parce que des entreprises de transport ont étendu leurs prestations à de l'entreposage, du conditionnement, de la gestion en douane, de la transformation, etc., le tout piloté par des technologies d'information particulièrement élaborées, que l'on ne produit plus pour stocker, mais directement pour répondre aux commandes passées par le client final.

Il s'agit là d'un mouvement dont l'une des conséquences est que l'entreprise industrielle ou commerciale se dessaisit de certaines opérations au profit d'une entreprise à même d'offrir des prestations logistiques dans un processus d'externalisation de ce qui ne constitue pas le cœur de son métier. Avec la multiplication des échanges internationaux – en effet au sein de l'Union Européenne par exemple le taux d'expansion des transports internationaux est double de celui des transports intérieurs – la difficulté d'organisation des transports est renforcée, ce qui accroît l'intérêt des solutions clés en main offertes par les prestataires logistiques. Ces dernières sont individualisées et veillent à créer une chaîne de transport et de façonnage sans obstacle et notamment sans perte de temps avec en plus une très grande fiabilité.

Si à l'intérieur de l'Europe, les chaînes logistiques s'appuient essentiellement sur la rapidité, la souplesse, l'adaptabilité, la flexibilité des transports routiers de marchandises, au niveau mondial on assiste à une croissance continue du transport aérien de marchandises et du transport maritime, notamment de conteneurs. A ce niveau, on constate en particulier que les transporteurs les plus importants tentent de contrôler l'ensemble de la chaîne logistique par des fusions-acquisitions d'entreprises, ce qui conduit à une élimination des intermédiaires et à une redéfinition du rôle et de la marge de manœuvre des autorités portuaires face à la concentration des acteurs de la chaîne logistique. Il est clair également qu'en matière d'implantations industrielles d'envergure internationale, les ports sont partie prenante de la concurrence qui existe entre les chaînes logistiques. A cet égard, la desserte de l'*hinterland* portuaire joue un rôle très important et illustre le fait que les modes de transport sont complémentaires, ce qui renforce la nécessité pour les acteurs du transport, notamment les pouvoirs publics, de penser en terme d'impératifs logistiques et non de développement modal pris isolément. Dans cette perspective, il peut être utile au niveau européen de parvenir à une coopération entre ports pour éviter une surcapacité chronique et précisément le subventionnement de cette surcapacité par les pouvoirs publics dans un contexte où les autorités portuaires perdent de leur pouvoir face à la concentration des acteurs de la chaîne logistique entre les mains de quelques groupes de transport particulièrement puissants et qui ont réussi à acquérir un pouvoir de marché non négligeable.

Il est toutefois envisageable qu'avec le renchérissement du prix de l'énergie et le fait que les modes de transport privilégiés pour les marchandises sont certes les plus rapides pour éviter les temps morts, mais aussi les plus consommateurs d'énergie ou encore les plus affectés par la congestion croissante des infrastructures, on assiste à une redéfinition de ces organisations logistiques. En effet, l'on ne peut exclure que l'on soit à la fin du processus de décroissance du prix du transport et que son renchérissement conduise à un nouvel arbitrage entre temps de transport et coût de ce dernier. Au niveau intraeuropéen cela peut devenir favorable à la voie d'eau par exemple ou aux autoroutes de la mer, tandis qu'à un niveau intercontinental, le transport maritime pourrait voir sa vitesse diminuée pour abaisser la consommation de carburant des navires et le transport aérien ne plus enregistrer des progressions exceptionnelles. La contrainte environnementale ne fait bien sûr que renforcer la probabilité d'une inflexion des systèmes logistiques actuels avec par exemple l'inclusion du

transport dans les schémas d'émission de droits à polluer. A plus long terme, l'affectation spatiale des activités pourrait se voir affectée par cette prise en compte de l'impact négatif du transport en matière de changement climatique et de consommation d'énergie.

Dans ce contexte, le Symposium a souligné l'attrait de ce que l'on appelle les « *freight villages* » dans la mesure où ils rassemblent sur un même lieu l'ensemble des opérateurs de la chaîne de transport et favorisent ainsi, au moins virtuellement, les solutions intermodales. Il est essentiel à cet égard que chaque mode de transport soit au rendez-vous de la fiabilité pour permettre précisément de synchroniser chaque étape du processus de production–distribution des biens. L'on peut en effet estimer que l'impératif de fiabilité souvent compte tout autant que celui de la rapidité du transport. On cite à cet égard fréquemment les organisations logistiques juste à temps de chaînes de montage, par exemple dans la branche automobile, pour montrer à quel point ces dernières sont sensibles à l'acheminement synchronisé de composants dont la production est répartie sur le territoire de plusieurs pays différents.

2. LES DÉFIS POUR LA POLITIQUE DES TRANSPORTS ET LES RÉPONSES

2.1. Globalisation et infrastructure de transport

La première chose qui saute aux yeux lorsque l'on se penche sur les défis qu'ont à relever les hommes politiques en matière de décisions dans le domaine des transports est un point mentionné dans la première partie de cette synthèse des débats du Symposium et qui est l'indispensable appréciation juste des effets d'une nouvelle infrastructure. Précisément les débats du Symposium ont montré que la question des investissements d'infrastructure est fondamentale dans toute réflexion sur la globalisation des économies.

Le Symposium a en effet montré que si les routes du commerce international sont historiquement restées stables pendant parfois plus d'un millénaire (on pensera par exemple à la route de la soie ou au rôle joué par les courants marins sur la méditerranée), on assiste en fait actuellement à une nouvelle configuration des routes internationales avec par exemple le rôle joué par l'Asie de l'Est dans le commerce mondial, les échanges induits par l'Aléna en Amérique du Nord ou encore le marché et la monnaie unique en Europe. Fondamentalement, on assiste en fait à une accélération des processus de transformation de l'économie mondiale, ce qui conduit à un degré de mobilité des nœuds et réseaux de transport inconnu jusqu'à présent. Encore faudrait-il ajouter à cette problématique spécifique aux échanges de marchandises, le rôle joué par les migrations de population ou, en plus remarquable, celui joué par la multiplication des contacts entre personnes de nations distinctes qui est induit par la mondialisation des économies et permis par le transport aérien, ceci pour se faire une idée de l'apparition d'une nouvelle connectivité entre pays.

L'une des conséquences indiscutable des phénomènes précités est que des investissements dans l'infrastructure de transport sont nécessaires. Toutefois, il ne s'agit pas comme cela a été plutôt critiqué au cours du Symposium de soutenir des mégaprojets en parachevant des réseaux transeuropéens qui en grande partie ne sont que des projets d'envergure nationale répondant précisément à des besoins nationaux, mais de se pencher sur des maillons manquants ou insuffisants dans le cadre de la nouvelle géographie des échanges qui se dessine sous nos yeux. Très concrètement, on en vient ainsi à désigner des extensions aéroportuaires, à promouvoir les autoroutes de la mer, à souhaiter accroître la capacité des ports à traiter le trafic de conteneur et à adapter cette capacité à la taille des navires, à ajuster la qualité de desserte des *hinterlands* portuaires à la croissance d'activité des ports, à

promouvoir le rôle déterminant joué par les technologies d'information dans l'amélioration des performances et du fonctionnement des systèmes de transport ou encore à investir dans les équipements permettant de diminuer notablement les temps d'attente à certaines frontières ou à permettre l'interopérabilité ferroviaire.

Même si le commerce international connaît un taux de croissance élevé, les frontières comptent encore. La plupart des entreprises desservent encore des marchés locaux et la distance joue un rôle de premier plan dans la composition et l'orientation du commerce international. Il semblerait que les frontières ont encore un impact négatif sur les échanges et que la planification par les entreprises de leurs marchés potentiels se fait encore essentiellement à l'intérieur des frontières. Les rapports présentés au cours du Symposium montrent qu'il existe encore des obstacles institutionnels de premier plan au développement des échanges internationaux. Le développement des échanges dans la zone de l'ALENA par exemple, est encore limité par les barrières aux échanges qui affectent le transport international.

De plus, certains des rapports présentés au cours du Symposium montrent clairement qu'une politique d'investissements davantage cohérente est nécessaire. A la fois le financement et la fourniture d'infrastructures devraient impliquer une coopération régionale et internationale renforcée entre décideurs politiques. L'on a besoin de solutions bilatérales pour le moins au problème des investissements propres à faciliter les passages frontaliers. Des investissements ciblés apporteraient des bénéfices évidents à d'autres pays à l'intérieur d'une même zone économique. Cependant, les frontières comptent dans le processus de décision dans la mesure où beaucoup d'investissements doivent répondre à des critères politiques nationaux. Il peut s'agir d'un domaine où la coopération internationale peut aider à dépasser ces obstacles et peut également permettre de tenir compte de l'effet à l'intérieur de chaque pays des investissements.

Enfin, l'importance grandissante du transport aérien et des aéroports contribue au dépassement du problème des frontières. Le transport aérien est particulièrement flexible en ce qui concerne l'éventail des destinations qu'il peut desservir, s'affranchissant par la même des problèmes physiques de passages des frontières que connaissent d'autres modes. L'avantage du transport aérien est patent là où les distances de transport sont très importantes et là où la rapidité et la fiabilité sont requises pour les déplacements de personnes ou bien de marchandises de faibles poids. Cependant, dans le même temps, une dimension importante pour la recherche comme pour l'action politique sur la question des échanges internationaux est liée aux externalités environnementales, particulièrement du transport aérien.

Le rôle proprement dit des investissements dans l'infrastructure a été soutenu au cours du Symposium par des travaux de recherche qui tendent à démontrer que les investissements dans l'infrastructure de transport ont dans le long terme un taux de rentabilité socioéconomique supérieur aux taux que l'on peut mettre en évidence à court terme mais aussi supérieur à ceux de la plupart des investissements privés, ceci à cause des effets dynamiques et notamment de débordement d'un pays à l'autre dans le cas des infrastructures internationales. En fait, un pays qui est faiblement doté en infrastructures pourrait trouver par exemple sous-optimal d'investir dans des infrastructures internationales à cause de la ponction importante sur les ressources de ce pays à court terme qu'implique la construction d'une infrastructure alors même que les effets bénéfiques se feront sentir à long terme et donc au-delà du mandat politique de ceux qui pourraient décider en faveur d'un tel investissement. Entre pays plus richement dotés, il est indéniable que les effets dynamiques et de débordement en dehors du strict cadre national des infrastructures internationales appellent une coordination internationale : les effets de

débordement peuvent en effet avoir des conséquences bénéfiques dans un autre pays que celui qui assume directement les coûts d'un projet abaissant les obstacles au transport international.

L'ensemble de ces assertions a été quelque peu contesté au cours du Symposium, mais toutefois pour parvenir à la conclusion que ce qui est essentiel n'est pas de se focaliser sur le montant global consacré aux investissements d'infrastructure, mais d'effectuer un investissement pertinent par sa nature et également pertinent en temps et en lieu. L'on en revient donc à la problématique des investissements internationaux susceptibles d'accompagner le processus de mondialisation des économies. Il a été par exemple proposé de réserver un soutien financier international uniquement à de tels projets. Il y aurait lieu toutefois d'ajouter l'importance des infrastructures de transit pour les rendre éligibles à de tels financements. Parvenir à associer le secteur privé sous forme de partenariats semble à bien des égards être une solution à la rareté de l'argent public et semble également être un pas supplémentaire dans le sens d'une garantie de pertinence des choix effectués ou encore, plus simplement, de maîtrise des coûts du projet. Cependant, ce qui ressort surtout des discussions du Symposium, c'est le besoin d'un paradigme stable en matière d'intervention et d'action publique pour que les investisseurs internationaux puissent évaluer l'opportunité des projets et mesurer les risques.

En guise d'illustration de la spécificité des transports internationaux, il a été avancé au cours du Symposium que par exemple dans la vallée du Rhône en France, les trafics routiers internationaux ont une élasticité supérieure à 1 et que le trafic de transit a encore une élasticité plus forte, supérieure à 2, rapportée à la croissance de l'économie. Ceci montre clairement le besoin d'infrastructures nouvelles pour suivre la croissance des flux internationaux et pose la question de la politique, dans ce cas européenne, qui peut répondre à ces besoins. Si au niveau européen sous l'effet des limites des possibilités du financement public international proprement dit, l'on est passé d'un financement par le contribuable à un financement par l'utilisateur, ce qui économiquement est on ne peut plus rationnel, notamment par l'eurovignette qui marque un pas positif dans ce sens même s'il est imparfait, l'on n'en a pas moins besoin de méthodes cordonnées et standardisées d'évaluation des projets d'infrastructure pour assurer leur comparabilité et les hiérarchiser.

Enfin, l'exemple des travaux élaborés dans le cadre de la Banque Mondiale montre, ici dans le cas des infrastructures routières, que leur qualité proprement dite a un effet sur la capacité des pays à participer aux échanges internationaux. Les gains permis par l'amélioration des infrastructures routières seraient supérieurs à ceux que l'on peut attendre d'un abaissement des tarifs douaniers ou encore d'une amélioration des procédures douanières. Même si l'appareil statistique dont on dispose impose d'avoir une certaine prudence et nécessite des travaux complémentaires avant de pouvoir attester d'une fiabilité totale de ces résultats qui portaient sur les pays les plus à l'Est de l'Europe, les participants du Symposium n'ont pas contesté le rôle stratégique que peut jouer l'infrastructure et son adéquation aux besoins dans le développement des échanges. Pour les pays à niveau de développement peu avancé, comme l'exemple de la région de l'Asie du Nord-Est qui a été présenté dans d'autres travaux au cours du Symposium, la polyvalence et la souplesse des infrastructures routières leur font jouer un rôle primordial par rapport à une alternative ferroviaire.

2.2. Régulation nationale et transport international

Des travaux présentés lors du Symposium tendent à prouver qu'un secteur comme le transport qui sert de vecteur et d'intermédiaire dans le commerce international doit être

parfaitement compétitif si l'on ne veut précisément pas que ce soit ce secteur qui absorbe les effets bénéfiques des échanges internationaux. La question posée dans ce contexte était celle de l'impact sur le commerce international de la déréglementation d'une industrie de service qui sert d'intermédiaire. Les travaux présentés démontrent que la structure du secteur des transports importe et que notamment elle induit un risque que les gains du commerce international soient diminués et non équitablement répartis si le transport international n'est pas compétitif au sens d'une structure concurrentielle du secteur. Ainsi, le volume des échanges commerciaux entre deux pays est inversement corrélé au degré de concentration du secteur des services correspondants aux transports. La structure du secteur des transports influence le volume des échanges commerciaux et l'identité de ceux qui en bénéficient avec le risque que ce soient les acteurs du transport qui accaparent la rente du producteur. Si les barrières commerciales institutionnelles sont faibles, le rôle du transport est encore plus accentué. Ainsi, le transport peut devenir un problème d'autant plus sérieux que les barrières aux échanges ont été abolies et l'impact du transport peut d'autant plus être important que les pays concernés sont peu avancés économiquement parlant. En fait, un secteur des transports imparfaitement compétitif peut avoir le même effet que de fortes barrières commerciales.

L'analyse ainsi présentée a montré à quel point il importait d'avoir une organisation concurrentielle du secteur des transports de marchandises alors même que l'on constate à l'heure actuelle l'émergence sur la scène internationale de grands groupes par des mouvements de fusion-acquisition qui tendent à intégrer les différents aspects de la chaîne logistique et à lui conférer une structure oligopolistique. Il y a donc là une question qui touche à la régulation d'un secteur comme le transport dont l'une des caractéristiques est d'avoir une forte dimension internationale.

Une autre dimension de la vigilance particulière dont les pouvoirs publics doivent faire preuve en matière de transport tient au rôle et à la place des entreprises publiques. Au sein de certaines zones économiques – et l'on pensera ici à l'ASEAN qui a été cité au cours du Symposium – il est quasiment impossible d'aboutir à la structure concurrentielle mentionnée ci-dessus pour le secteur des transports étant donné la place et le rôle des entreprises publiques. Dans une certaine mesure, le rôle de régulation du secteur a été capturé par ces entreprises qui identifient leur intérêt propre comme l'intérêt même du secteur. Elles disposent à cet égard de privilèges par rapport à leurs concurrents commerciaux, comme la couverture automatique de leurs pertes, le financement des investissements sur fonds publics, la capacité d'extraire des revenus des missions de service public, la pratique de subventions croisées qui peuvent aboutir à évincer leurs concurrents de certains marchés, la garantie de l'État sur les emprunts, des exemptions de certains règlements ou de certaines obligations, etc. Au total, la présence de ces entreprises peut aboutir à fausser la concurrence et représente concrètement une illustration de l'analyse précédente qui a tendu à montrer qu'un secteur des transports peu compétitif pouvait affecter le volume des échanges et l'identité de ceux qui en tirent des bénéfices.

La question qui est ici posée est bien celle du fonctionnement d'un secteur où coexistent des entreprises publiques et des entreprises privées, secteur dont l'évolution doit aboutir à une régulation par les mécanismes du marché pour qu'il ne soit pas un obstacle aux échanges et pour que les prestations soient offertes au moindre coût. Concrètement, une déréglementation précipitée d'un tel secteur où les entreprises publiques disposent de privilèges est de nature à renforcer la place de ces entreprises plutôt que d'aboutir à une structure concurrentielle qui soit opérante.

Il s'agit en fait aussi de remarquer qu'il faut des règles pour que le marché ainsi obtenu fonctionne selon l'optique d'une concurrence qui se rapproche du modèle théorique idéal. Au-

delà de l'institution d'une réglementation pour la sécurité, les conditions de travail ou d'autres fonctions régaliennes dont les États sont en charge et pour lesquelles ils doivent édicter des règles qui s'imposent à toutes les entreprises, trois orientations doivent inspirer les pouvoirs publics pour rendre le secteur des transports concurrentiel :

- L'institution d'un code de conduite et de lignes directrices sur la gouvernance des entreprises, applicable notamment aux entreprises publiques afin, entre autres, de rompre la capture du pouvoir réglementaire par l'administré,
- Mettre en place des règles pour que par exemple les missions de service public opérées à perte soient attribuées à l'entreprise la moins disante pour ce faire selon une procédure transparente et non systématiquement à l'opérateur public historique et également mettre en place des règles de concurrence pour éviter par exemple les abus de position dominante ou les ententes entre entreprises,
- Préciser le rôle, l'organisation et les pouvoirs des autorités de régulation du secteur.

A propos des autorités de régulation du secteur, dans un domaine comme le transport qui voit des entreprises de différentes nationalités s'affronter sur le marché international, on peut à cet égard par exemple penser au transport aérien, la question a été posée de savoir s'il ne fallait pas des autorités de régulation supranationales. Il est clair que l'objectif est d'avoir par exemple dans l'aérien des réseaux de transport opérés de manière efficiente. Toutefois, dans cette perspective, il peut exister une contradiction entre ce qui peut ressortir comme étant optimum au niveau national et les impératifs d'un optimum à l'échelle internationale. L'exemple qui a été donné au cours du Symposium correspondait à l'acceptation par les autorités de régulation de deux pays d'une fusion entre entreprises de ces deux pays qui si elle avait sa pertinence économique a été rejetée par l'un des pays pour des raisons qui tiennent non pas au fond mais plutôt sur des divergences quant à la façon d'instruire le dossier économique de cette fusion qui portait précisément sur le transport aérien. Cet exemple a surtout introduit l'idée qu'un optimum national n'est pas forcément un optimum international et que si par exemple en Europe le degré poussé d'intégration des économies plaide assez facilement pour que l'on envisage un jour d'avoir un régulateur européen pour certains domaines du transport, il n'en est pas moins vrai que des intérêts nationaux propres peuvent dans une certaine mesure être lésés et que donc des mécanismes de compensation doivent être explicitement envisagés pour qu'une telle évolution voit le jour. Un premier pas dans ce sens et qui d'ailleurs apparaît déjà comme étant indispensable est le partage d'expériences et d'analyses entre régulateurs de différents pays d'un même domaine voire de domaines voisins.

Une illustration plus simple du type de question qui est soulevé est donnée par le transport routier de marchandises en Europe : certains pays à l'heure actuelle s'inquiètent de la dégradation de leur part de marché en transport international, leurs transporteurs tendant à se replier sur le marché domestique. La question que l'on peut soulever est de savoir si la nationalité du transporteur est une question plus pertinente que celle qui consiste à s'assurer indépendamment de sa nationalité que le transporteur respecte toutes les règles qu'elles soient environnementales, de sécurité ou encore de conditions de travail et que, partant de là, la prestation de transport est proposée au moindre prix – ce qui inévitablement ressort comme un gain pour l'économie dans son ensemble.

A un autre niveau, l'exemple de l'Accord de Libre Échange Nord-Américain qui a été donné au cours du Symposium, accord qui n'a pas explicitement concerné le cabotage maritime, montre que pour que ce dernier type de transport joue un rôle à la mesure des espérances qu'il suscite, des transformations des dispositions tant douanières, réglementaires, fiscales,

technologiques ou administratives sont nécessaires et que ceci n'est possible que dans le cadre d'accords qui précisément ne tiennent pas le transport à l'écart des négociations. On peut en conclure dans une certaine mesure que le transport ne doit pas être tenu à l'écart des négociations qui touchent les termes du commerce international.

Enfin, la question de la sûreté dans le contexte des transports renvoie certes à une évaluation coûts-bénéfices des dispositions envisagées, mais aussi à un cadre harmonisé entre modes de transport, qu'il s'agisse de transport de voyageurs ou de marchandises. Elle soulève notamment dans cette perspective des questions telles que celles du financement des mesures ou de la non-discrimination entre pays ou entreprises, toutes questions qui ont leur place dans un cadre multilatéral où l'échange d'expérience est de la première importance.

2.3. Transport international et contrainte environnementale

Il est impossible de parler du transport et de la globalisation sans se pencher sur l'un des défis majeurs qui se pose à nos civilisations, celui du changement climatique sous l'effet des gaz à effet de serre. Si l'on tient compte du potentiel de croissance économique de nos économies d'ici 2050, l'objectif de stabiliser les concentrations en CO₂ de l'atmosphère à un niveau inférieur à 450 parts par million, impose de réduire de 75 % les émissions par unité de PIB.

Il importe toutefois de remarquer que l'activité transport compte pour environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Ceci veut aussi dire que 80 % sont en dehors. Toutefois, les émissions du transport sont en croissance sous l'impact par exemple de la croissance du transport aérien et de l'accession à la civilisation de l'automobile de certains pays émergents tels la Chine et dans une moindre mesure l'Inde, en résultat de la hausse des niveaux de vie.

Les experts du Symposium ont tenu à souligner cependant qu'au sein des transports, le transport international représente une part minoritaire : plus de 80 % des transports ont lieu à courte et moyenne distance, ce qui explique d'ailleurs l'importance prise par les transports routiers particulièrement adaptés à cette configuration des besoins de déplacement. Il n'y a donc pas de spécificité du transport international comme responsable majoritairement des émissions de gaz à effet de serre.

Estimer que le défi qui se pose à nos sociétés est d'utiliser le transport pour engranger les effets bénéfiques de la mondialisation et du commerce international sur un plan économique, tout en veillant à contenir les émissions de CO₂, n'est donc pas une erreur de la pensée. Le défi n'est ainsi pas de restreindre drastiquement l'activité transport, notamment internationale. Il en ressort que la priorité est d'accroître « l'efficacité » du système de transport. L'inflexion globale est donc de passer d'une politique qui jusqu'à présent a plutôt été une politique d'offre de transports à une politique de gestion pertinente de la demande.

Ceci peut être obtenu en veillant à une tarification efficiente de l'usage des ressources consommées par le transport, qu'il s'agisse de la tarification d'usage des infrastructures ou de taxes sur les carburants qui reflètent le caractère non renouvelable de cette forme d'énergie. Cette tarification doit également refléter les dommages potentiels que le transport contribue à créer en émettant des gaz à effet de serre au même titre que toute activité économique émettrice. Là, la question soulevée est celle de l'inclusion éventuelle du transport, par exemple aérien, dans le marché des droits à polluer.

La tentation est grande de dire que la problématique de l'environnement doit être abordée avec une analyse rationnelle : pourquoi par exemple, les transports devraient-ils être taxés au-delà de ce que coûtera en dommages vraisemblables le changement climatique que leur activité induit ? Dans l'état actuel du marché des permis d'émission au sein de l'Union Européenne, la tonne de CO₂ émise ressort à un coût de 10-20 euros. Ce chiffre, traduit en cents d'euro par litre de carburant consommé par les transports routiers, est bien inférieur au niveau de taxes courant en Europe pour ce qui est des carburants pétroliers. Le transport routier paie donc plus que le prix nécessaire à garantir un évitement des dommages au niveau acté dans les engagements internationaux. En effet, le mécanisme par lequel les permis d'émission ont été mis en place en Europe ne correspond pas à une évaluation des dommages, mais à un prix d'évitement de ces dommages par le rationnement progressif des droits à polluer. En revanche, il est tout à fait possible, bien que non démontré, que les dommages dus à l'effet de serre aient un coût très élevé pour nos sociétés, notamment à cause de phénomènes d'irréversibilité des transformations induites. Une très grande prudence s'impose donc au niveau des chiffrages et, de toute façon, cela n'est pas parce que l'on a payé le prix d'un dommage que celui-ci devient pour autant acceptable. La piste qui consiste à estimer que le coût des dommages doit être couvert, notamment à son niveau d'évitement, n'est pas contestable sur un plan théorique. En revanche l'on a encore besoin d'un approfondissement, par exemple en ce qui concerne la pertinence des chiffrages lorsque l'on veut évaluer les dommages potentiels et les objectifs d'émissions à atteindre pour éviter précisément ces dommages. Pour autant, il ne fait aucun doute que le secteur des transports doit être inclus à terme dans le périmètre d'application des permis à polluer dans la mesure où de tels permis apparaîtraient comme le moyen le plus opportun par rapport, par exemple, à une taxation de la consommation de carbone, de parvenir aux objectifs fixés dans les accords internationaux. De la tarification d'usage des infrastructures à l'éventuel échange marchand de droits à polluer, ce sont les principes mêmes d'un usage efficient des ressources qui doivent être mis en œuvre.

Il est clair également qu'au-delà de la part actuelle du transport dans le processus global de pollution, se pose surtout le fait que les transports, notamment ceux qui sont les plus émetteurs de gaz à effet de serre, sont en forte croissance. Sur cette question, l'avis des experts du Symposium est plutôt nuancé : il existe un très vaste gisement d'accroissement de la productivité des transports, notamment de marchandises, sous l'effet par exemple de la diminution des chargements partiels ou de la consolidation des offres de transports, cela sans même compter que les marchandises transportées évoluent. Ainsi par exemple, la Finlande exporte beaucoup moins de bois qui a été remplacé par des exportations de téléphones portables, un bien particulièrement léger. Pour un même niveau d'échanges en valeur marchande, des solutions transports bien différentes se mettent en place. Ceci veut dire que l'accroissement des échanges n'implique pas forcément une croissance très forte des transports internationaux. Ce qui en revanche semble avéré, c'est que précisément la division internationale du travail va se poursuivre – pour certains experts nous n'en sommes qu'au début de ce processus – et que donc les échanges internationaux vont s'accroître. Prédire pour autant une croissance des transports dans la même proportion n'est pas une certitude.

Une autre piste qui s'impose en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre est la contribution du progrès technologique à la résolution des problèmes environnementaux. Dans les faits, des progrès considérables ont été faits par les constructeurs de véhicules, qu'il s'agisse de véhicules industriels ou automobiles, pour abaisser le niveau des émissions et ceci notamment sous l'effet de normes imposées par les pouvoirs publics. Une avancée dans la même direction a été faite dans le cadre de la CEMT qui a par exemple lié l'accroissement de son contingent d'autorisations multilatérales de transport routier de marchandises à l'utilisation de véhicules propres. Toute une série d'incitations sont envisageables, qu'elles soient fiscales

ou réglementaires, pour inscrire le secteur des transports sur la voie d'une progression significative en matière d'environnement, même si l'on peut constater à l'heure actuelle que certains des engagements pris, par exemple par les constructeurs de véhicules, ne seront probablement pas tenus dans leur intégralité à l'échéance fixée. Il faut y voir l'effet pervers d'autres contraintes, par exemple celles imposées par les pouvoirs publics en matière de sécurité des véhicules.

Reste un domaine dans lequel les avancées sont difficiles à susciter, c'est celui de l'inscription spatiale des activités : des transports, notamment routiers, financièrement accessibles à une majorité de la population ont conduit à une dispersion spatiale des activités, alors même que les contraintes actuelles tendraient à affirmer qu'il nous faut aboutir à dessiner une répartition des localisations qui soit économe en transports. Certains estiment que des prix de transport qui reflètent les coûts induits par ces transports sont suffisants pour oeuvrer dans cette direction, mais tel n'est pas un avis unanimement partagé. La difficulté à élaborer des politiques spatiales qui s'inscrivent dans la direction de la durabilité, et qui touchent à la gouvernance des territoires, est patente.

3. CONCLUSIONS

Le Symposium de Berlin a couvert un large panorama de thèmes ayant trait aux conséquences du processus de mondialisation à l'œuvre à l'échelle de la planète. S'il n'y a pas de doute sur le fait que pour un pays, participer aux échanges mondiaux de biens et services peut être source d'enrichissement, il n'en est pas moins vrai qu'une adaptation des structures sociales est requise pour éviter que ce soient les laissés pour compte de ce processus qui polarisent le débat et en masquent les bénéfices, indépendamment des problèmes humains auxquels il est légitime de trouver une solution acceptable.

Des questions de régulation du secteur des transports se posent également et il importera pour les pouvoirs publics de ne pas s'enfermer dans une conception nationale de telles politiques, mais de saisir les enjeux à un niveau plus élevé, par exemple celui de l'Europe prise dans son ensemble. Reste aussi la problématique de l'environnement et donc la problématique du respect pour le moins des engagements internationaux pris à cet égard : certains participants du Symposium ont fait valoir que cette question aurait méritée d'être abordée dans le cadre d'une session qui lui aurait été pleinement dédiée. En fait, c'est oublier qu'il n'y a pas d'enjeu spécifique lié au transport international en matière de contrainte environnementale dans la mesure où le transport international, s'il est certes en croissance, ne représente cependant pas, et de loin, la majeure partie des transports. En outre, cette question de l'environnement a été évoquée dans nombre des contributions présentées au cours du Symposium et l'on peut à partir de là dresser un ensemble de conclusions dont la partie 2.3. (« Transport international et contrainte environnementale ») de cette synthèse s'inspire. A l'heure actuelle, on peut légitimement estimer que la question principale est d'extraire de la mondialisation les bénéfices économiques qu'elle véhicule potentiellement, tout en veillant à un usage rationnel d'un secteur intermédiaire comme les transports, notamment au regard des grands défis que le monde a à relever.

Appendice 2

Table Ronde, 7-8 juin 2007, Paris

Biocarburants : lier les politiques de soutien aux bilans
énergétiques et environnementaux

Synthèse et CONCLUSIONS

Sommaire

- 1. Conclusions et messages à l'intention des décideurs**
- 2. Introduction**
- 3. Incidences en matière d'énergie et de gaz à effet de serre**
Incertitudes
Impact sur l'écosystème
- 4. Subventions, rentabilité des politiques d'aide aux biocarburants
et répercussions indirectes sur l'économie**
- 5. Carburants de deuxième génération – performances et potentiel**
- 6. Possibilités d'exportation de l'éthanol brésilien**
Commerce de biocarburants
- 7. Certification – the potential for linking support to performance**
- 8. Production de biocarburants : perspectives**

23

1. Conclusions et messages à l'intention des décideurs

Bien que le présent compte rendu n'ait pas la prétention de livrer le point de vue unanime ou négocié des participants à la Table Ronde, un certain nombre de propositions ont recueilli un large soutien.

Réduction des émissions de gaz à effet de serre : performances des biocarburants

Les débats tenus lors de la Table Ronde ont mis en évidence la diversité des performances des biocarburants, tant en ce qui concerne leur bilan énergétique que les émissions de gaz à effet de serre (GES) pendant leur cycle de vie. Ces performances varient selon le carburant considéré, voire même, pour un même carburant ou une même matière de base, selon le processus de production ou les méthodes de culture. Dans les cas les moins favorables, certains biocarburants produisent beaucoup plus de gaz à effet de serre que l'essence ou le gazole.

Les discussions ont montré en outre que de nombreuses incertitudes subsistaient dans les estimations des émissions de CO₂ émanant des sols et des émissions de N₂O liées à la culture des matières de base. Ces émissions, qui diffèrent suivant le type de sol et les techniques de culture employées, peuvent représenter une forte proportion des émissions globales de GES enregistrées pour certains biocarburants conventionnels.

S'agissant des biocarburants qui ne permettent qu'une réduction relativement faible des émissions de GES (jusqu'à 30 % environ), comme l'éthanol produit à partir du maïs ou de

diverses autres céréales, le degré d'incertitude peut s'avérer supérieur au bénéfice moyen escompté. Le risque existe donc que de tels carburants ne présentent que de faibles avantages, voire produisent plus de gaz à effet de serre que les produits pétroliers.

On produit actuellement de petites quantités de biocarburants à partir de lactosérum et d'huiles alimentaires usagées : la réduction des émissions de GES ainsi obtenue est relativement importante, puisqu'elle avoisine 70 %. Le seul biocarburant produit à grande échelle dont les performances soient comparables est l'éthanol brésilien fabriqué à partir de la canne à sucre. Pour être viable, toutefois, cette production a besoin d'aides fiscales représentant approximativement un milliard d'USD par an.

La plupart des autres productions de biocarburants à grande échelle (éthanol de betterave sucrière ou de sorgho, biodiesel produit à partir du colza, de l'huile de soya ou de l'huile de palme) réduisent de 30 à 50 % les émissions de gaz à effet de serre, mais nécessitent d'importantes subventions.

Coûts et mise en place de nouvelles politiques

Des points de vue divergents ont été exprimés quant à la quantité de biocarburants qu'il serait possible de produire durablement. La plupart des biocarburants sont cependant coûteux, notamment si l'on tient compte du facteur environnemental. Seul le maintien à long terme d'un prix élevé du pétrole pourrait aboutir à la production de biocarburants en quantités commercialisables. Si les subventions étaient ramenées à un niveau reflétant la contribution des biocarburants à la réduction des GES, une grosse partie de la production devrait cesser.

Si l'objectif consiste à limiter la vulnérabilité de l'approvisionnement en énergie et à réduire les émissions de GES, l'amélioration de l'efficacité énergétique des moyens de transport offre des perspectives beaucoup plus intéressantes – et moins coûteuses – que la promotion des biocarburants.

Il serait également plus rentable, plutôt que d'octroyer des subventions ou de définir des objectifs concernant les biocarburants, d'appliquer des taxes liées à la teneur en carbones des carburants (y compris des biocarburants) directement axées sur les émissions de CO₂. Les droits d'accise prélevés sur les carburants sont très similaires à une taxe sur la teneur en carbone, quoique le montant en soit parfois élevé. En Europe, le montant des droits d'accise équivaut approximativement à une taxe sur le carbone pour l'essence et le gazole d'environ 200 euros par tonne d'équivalent CO₂, soit environ dix fois le coût actuel du CO₂ dans le système européen de permis négociables. On estime aujourd'hui que les mesures de soutien de l'éthanol aux Etats-Unis a un coût deux fois plus élevé dans les distilleries d'éthanol les plus performantes. Il en va de même pour le biodiesel produit à partir d'huile de palme dans l'Union européenne.

Biocarburants avancés

S'agissant des matières de base utilisées pour la production de biocarburants et des processus de production, les générations futures devraient émettre moins de gaz à effet de serre et pourraient présenter un meilleur rapport coût-efficacité. Ces biocarburants pourraient satisfaire jusqu'à 10 ou 20 % des besoins actuels en énergie dans le domaine des transports, un pourcentage qu'il sera impossible de dépasser sans d'importants progrès technologiques (Jones 2007).

L'éthanol produit dans des usines pilotes à partir de matières ligno-cellulosiques donne déjà de bien meilleurs résultats que la plupart des biocarburants conventionnels en termes d'émissions de GES, et s'avère aussi performant que le meilleur éthanol de canne à sucre brésilien. Les aspects économiques restent cependant assez flous ; s'agissant de production à grande échelle, l'approvisionnement potentiel en éthanol ligno-cellulosique se trouve limité par les questions de coût et de disponibilité des terres pour les cultures à visée énergétique. Un certain nombre de motifs justifient le soutien à la recherche sur les biocarburants avancés, sans cependant qu'il soit recommandable d'en arriver à un soutien illimité.

Efficacité des subventions

Les aides à la production à grande échelle et à la consommation de biocarburants conventionnels ne contribuent pas à la mise en œuvre des objectifs stratégiques que sont la réduction des émissions de GES ou l'amélioration de la sécurité d'approvisionnement des carburants destinés aux transports. Elles sont inefficaces sous l'angle d'une garantie de ressources pour les communautés rurales, et elles absorbent une part non négligeable de l'argent du contribuable (4 milliards d'USD en 2007 aux Etats-Unis pour les seuls allègements fiscaux, 4 milliards d'USD en 2006 au titre des allègements fiscaux dans l'Union européenne, entre 13 et 15 milliards d'USD pour l'ensemble des mesures de soutien dans la zone OCDE), sans que l'on en retire des bénéfices équivalents. L'Allemagne a entrepris de réduire les subventions aux biocarburants ; par ailleurs, le Royaume-Uni devrait atténuer progressivement l'écart qui existe actuellement entre les droits d'accise (20 pence, soit 0,29 euro par litre).

Réforme des politiques

Les objectifs concernant les volumes de production de biocarburants ne constituent pas des incitatifs suffisants, qu'il s'agisse de limiter les coûts, d'éviter les atteintes à l'environnement, voire même de veiller au respect des normes en matière de réduction des gaz à effet de serre. Il semble préférable de fixer des limites quant à la teneur en carbone des carburants, certificats à l'appui.

La Californie, les Pays-Bas, l'Allemagne, la Suisse, le Royaume-Uni et la Commission européenne s'emploient à mettre au point des systèmes d'homologation afin de réglementer le marché des biocarburants. Ces dispositifs visent à l'amélioration des résultats pour l'environnement. Si les pouvoirs publics continuent de promouvoir les biocarburants, il faudra se montrer plus sélectif dans le choix des producteurs et des processus à subventionner. Faute d'adapter ainsi la politique actuelle en conditionnant les aides à la certification, le taux effectif de réduction des GES – objectif prioritaire -- restera décevant, et ce malgré les progrès qui pourraient être enregistrés dans la production et la consommation de biocarburants. On peut également s'attendre à des retombées fâcheuses concernant d'autres objectifs liés au développement durable.

Il convient de souligner que les mécanismes de certification ne sont pas vraiment conçus pour faire face au problème des impacts indirects de la production de biocarburants. La certification permet seulement d'influer sur la garantie de la chaîne d'approvisionnement. Elle peut par exemple contribuer à modifier les méthodes agricoles et les modes de récolte des produits de la biomasse, afin de limiter les répercussions sur l'environnement. En revanche, elle ne pourra rien contre la délocalisation de certaines activités agricoles en raison du développement de la production de biocarburants, ni contre les changements qui en découleraient quant à l'exploitation des terres situées en dehors de la zone cultivée en vue de

la production de biocarburants. Des initiatives distinctes s'imposeront afin de protéger de toute forme de développement les écosystèmes naturels et semi-naturels qu'il importe de préserver.

La gamme actuelle des biocarburants, ainsi que leurs performances parfois médiocres en termes d'émissions de GES, résultent en partie de l'absence de réglementation ou d'incitations à sélectionner ces biocarburants en fonction de leur profil environnemental. La difficulté qui se pose pour la mise en place de systèmes de certification consiste à proposer des mesures incitatives tout en ménageant un bon rapport coût-efficacité.

2. Introduction

Le soutien des administrations nationales à la production de biocarburants a été motivé principalement par les politiques agricoles et énergétiques des pays, dont l'objectif est de remplacer le pétrole importé par des biocarburants, tout en soutenant le revenu des agriculteurs et les industries agricoles. Ces dernières années, ce soutien est devenu un élément essentiel de la politique menée par de nombreux pays pour réduire les émissions de CO₂ imputables au secteur des transports. L'importance relative accordée aux différents facteurs varie d'un pays à l'autre.

On estime que les aides à la production de biocarburants, en forte progression, ont atteint approximativement 15 milliards d'USD en 2007 pour l'ensemble de l'OCDE. De nombreuses administrations ont également imposé des quotas de biocarburants aux distributeurs de pétrole. L'Union européenne exige de ses Etats membres qu'ils fassent le nécessaire pour que les biocarburants répondent à 2 % de la demande en carburant dans les transports, une proportion qui devrait atteindre 5,75 % en 2010. La Commission européenne propose de porter cet objectif à 10 % d'ici à 2020¹. L'administration américaine a retenu l'objectif de 4 milliards de gallons d'éthanol (15 milliards de litres) pour 2006, soit près de 3 % du marché des carburants, et a proposé de viser une production de 35 milliards de gallons (130 milliards de litres) de biocarburants d'ici à 2017, ce qui devrait représenter quelque 9 % de la consommation dans le secteur des transports.

Tous les biocarburants n'ont cependant pas la même efficacité dès lors qu'il s'agit de les utiliser en remplacement du pétrole ou de réduire les émissions de gaz à effet de serre ; en promouvoir la production peut donc avoir des conséquences indésirables. Les aides à la production, ainsi que la demande croissante en céréales et oléagineux qui en découle, semblent avoir contribué à la flambée des prix des produits alimentaires et des aliments pour bétail sur les marchés mondiaux, alors que ces produits sont de plus en plus demandés pour des utilisations classiques. En outre, suivant les matières de base et les pratiques agricoles mises en œuvre pour leur culture, la production de biocarburants peut avoir de lourdes conséquences pour l'environnement, notamment : détérioration de la biodiversité, baisse de la fertilité des sols et augmentation des taux d'érosion, captage de quantités d'eau excessives, pollution des eaux. Dans certains cas, la culture de matières de base transformables en biocarburants peut même conduire à une nette augmentation des émissions de GES.

Ont participé à la Table Ronde 50 chercheurs de premier plan, spécialistes des aspects scientifiques et économiques des biocarburants, afin d'examiner la capacité de ces carburants à répondre aux attentes des pouvoirs publics qui ont fait le choix de les promouvoir, d'analyser

¹ Le Conseil européen a entériné cette proposition, sous réserve que soient élaborées des normes de durabilité, que les biocarburants de deuxième génération deviennent commercialisables et que la Directive sur la qualité des carburants soit modifiée de façon à permettre des taux d'incorporation adéquats.

les aspects économiques de la production de biocarburants et d'évaluer la possibilité de limiter les atteintes à l'environnement que pourrait entraîner une production à grande échelle. Dans ce contexte, la Table Ronde s'est intéressée à l'état d'avancement des systèmes de certification censés limiter les effets non souhaités, sur l'environnement, de l'action en faveur des biocarburants et de leur production.

Sous la présidence de Lyn Martin, du Bureau of Transport and Regional Economics en Australie, les débats ont traité des grands sujets ci-après :

- *incidences, en matière d'énergie et de gaz à effet de serre, de la production de biocarburants et de leur utilisation en remplacement des produits pétroliers dans le secteur des transports ;*
- *aspects économiques liés aux biocarburants ;*
- *potentiel des carburants de deuxième génération ;*
- *potentiel des exportations d'éthanol brésilien ;*
- **certification et possibilité de lier les aides aux performances ;**
- *impact des discussions sur l'action des pouvoirs publics.*

Le débat s'est articulé autour de cinq documents, dont chacun aborde l'un de ces sujets. On trouvera à l'adresse Internet :

<http://www.cemt.org/JTRC/EconomicResearch/RoundTables/index.htm> le texte des exposés établis à partir de ces différents documents.

3. Incidences en matière d'énergie et de gaz à effet de serre

Les participants ont d'abord passé en revue les travaux de recherche analysant l'impact, sous l'angle du bilan énergétique et des émissions de GES pour l'ensemble du cycle de vie, de la production de biocarburants en vue de leur commercialisation sur le marché des transports. Le débat a été lancé par M. Alex Farrell, de l'université de California Berkeley, qui a mis l'accent sur les résultats mitigés de ces travaux et a précisé les paramètres essentiels dont ils dépendent.

Le Groupe Energy and Resources de Berkeley a entrepris une comparaison détaillée de six études représentatives concernant les performances de l'éthanol de maïs produit aux Etats-Unis en termes d'énergie et d'émissions de GES (Farrell et al. 2006), dont les résultats ont été publiés dans le magazine *Science* en 2006. Quatre de ces six études sont parvenues à la conclusion que la production et la consommation de biocarburants dans le domaine des transports entraînent des émissions de CO₂ plus importantes que la production et la consommation d'essence (voir les petits cercles de couleur claire situés au-dessus de la ligne horizontale dans le schéma 1). Les incidences moyennes constatées vont d'une diminution de 20 % des émissions à une augmentation de 32 %. Quant au bilan énergétique net, deux des études ont observé que l'éthanol de maïs nécessite davantage de carburant d'origine fossile pour sa production qu'il ne génère d'énergie (cercles de couleur claire à gauche de la ligne verticale dans le schéma 1). Si toutes les études ont relevé des économies nettes en pétrole, une quantité considérable de gaz ou de charbon est cependant absorbée par le traitement de la biomasse nécessaire à la production d'éthanol.

La comparaison avait pour but d'étalonner les résultats en normalisant les hypothèses sur lesquelles les différentes études étaient fondées. Les principales différences recensées concernent les paramètres fixés pour les études (décisions quant aux éléments du système de

production global à prendre en compte ou à exclure), ainsi que les hypothèses relatives aux aspects suivants :

- la principale énergie utilisée dans les bio-raffineries – gaz naturel, pétrole, électricité ou charbon, dont le rendement thermique et les émissions de CO₂ diffèrent largement ;
- l'érosion des sols et l'oxydation du carbone contenu dans le sol découlant des cultures en cause ;
- l'application d'amendements calcaires sur les terres cultivables ;
- le traitement de l'énergie co-produite (contenu énergétique des sous-produits utilisables à des fins autres que la production de carburants).

La principale source d'énergie utilisée dans la production de biocarburants, et en particulier pour la distillation de l'éthanol, influe de manière décisive sur les émissions de gaz à effet de serre. L'efficacité des chaudières, très variable, permet également d'expliquer certains écarts de performances. Dans la plupart des régions, le gaz naturel ou l'électricité fournissent l'énergie nécessaire au processus de chauffe. Le prix élevé du gaz, toutefois, a conduit un certain nombre de nouvelles unités de production d'éthanol du Middle West américain à recourir au charbon, ce qui se solde par de fortes émissions de GES. Au Brésil, on brûle la bagasse (résidus de canne à sucre) afin de produire la chaleur industrielle et l'énergie électrique, ce qui explique en grande partie les excellentes performances de ce pays en matière de production d'éthanol (voir le document préparé par Edmar de Almeida pour la Table Ronde)².

Schéma 1. Bilan énergétique et émissions de gaz à effet de serre pour les différents modes de production d'éthanol de maïs : données provenant des documents publiés sur le sujet et adaptées dans un souci de cohérence

LEGENDE

En haut à droite :
Valeurs publiées –
Valeurs
équivalentes –
Essence – Méta-
modèle (EBAMM)

En noir, vertical
gauche : Quantités
nettes de GES (g.
d'éq.CO₂/MJ
d'éthanol) –
Horizontal :
Energie nette
(MJ/L)

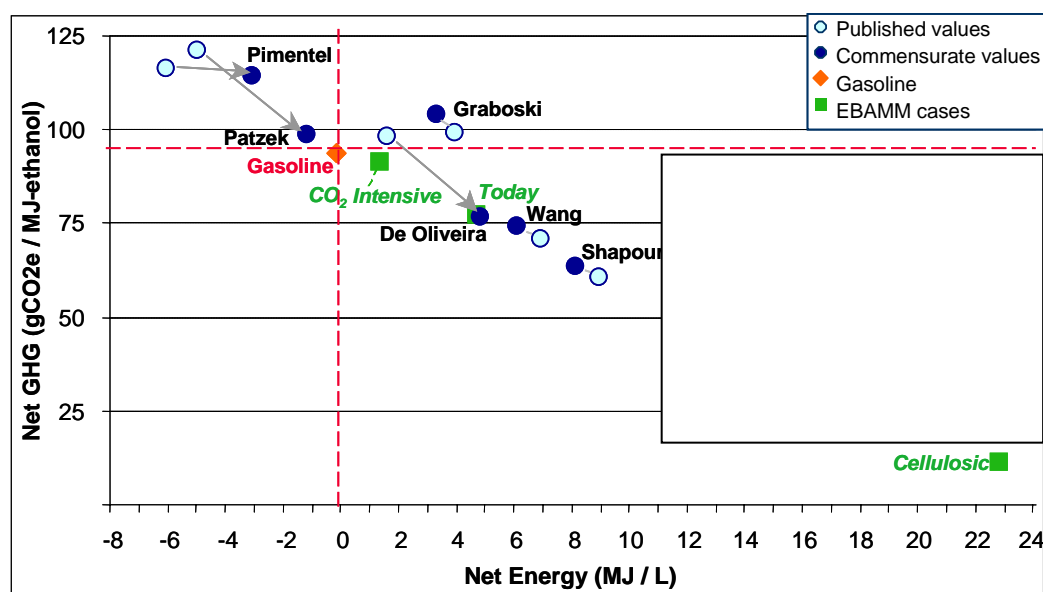
En rouge :
essence

En vert : Beaucoup
de CO₂ –
Aujourd'hui –
Cellulosique

Note: EBAMM =
Méta-modèle
d'analyse des

carburants de l'Energy Resources Group (ERG) de l'Université de Berkeley (California). Ce modèle fait l'objet d'un logiciel gratuit, et peut être téléchargé à l'adresse <http://rael.berkeley.edu>

Source Farrell et al, Science 2006 (voir la liste des Références pour connaître les sources originales de l'étude).



² Tout récemment, certains producteurs européens d'éthanol ont introduit la technologie de la membrane semi-perméable en remplacement de la distillation, avec à la clé d'importantes économies d'énergie.

L'équipe de l'ERG a élaboré un méta-modèle qui permet de comparer les résultats de toutes les études réalisées à partir d'hypothèses cohérentes. Des ajustements ont été effectués sur les points suivants :

- apports en énergie primaire ;
- aspects limites à prendre en considération (ajout de paramètres manquants, comme l'énergie nécessaire au traitement des résidus, et élimination d'éléments de paramétrage superflus) ;
- contenu énergétique des sous-produits.

Les ajustements effectués pour tenir compte des différentes hypothèses atténuent les écarts entre les résultats des études consacrées à l'éthanol de maïs produit aux Etats-Unis (voir les cercles noirs dans le schéma 1). Cela ne modifie pas pour autant leur position absolue. A une exception près, les études qui avaient constaté un solde énergétique négatif et des émissions de GES supérieures par rapport à la production et à l'utilisation d'essence (à gauche et au-dessus des lignes rouges) aboutissent aux mêmes résultats négatifs après ajustement. La moitié des études attestent, après correction, un solde négatif pour les émissions de gaz à effet de serre.

L'équipe ERG a sélectionné les données jugées les plus intéressantes dans les études originales, afin de procéder à trois études de cas au moyen de son modèle (schéma 1) :

- *L'éthanol aujourd'hui*, qui s'appuie sur des valeurs normales concernant la production d'éthanol de maïs aux Etats-Unis ;
- *Emissions importantes de CO₂*, étude menée à partir de plans visant à acheminer du maïs cultivé au Nebraska jusqu'à une usine de production d'éthanol située dans le Dakota du Nord et fonctionnant au lignite ;
- *Ethanol cellulosique*, sur la base de données figurant dans l'étude de Wang consacrée à l'éthanol ligno-cellulosique produit à partir du panic.

Ces éléments complémentaires ont permis de montrer que le volume des émissions de GES peut varier de 1 à 10 selon la matière de base utilisée pour la production d'éthanol. Les études de cas précitées illustrent en outre la forte réactivité des résultats à la teneur en carbone du carburant employé pour le traitement et la distillation, étant entendu que les usines alimentées au charbon et les modes de production nécessitant de nombreux transports sont étiquetés « à forte intensité de CO₂ ». Ce scénario englobe le transport de maïs par le train, sur de longues distances, avec des locomotives diesel. Le transport occupe une place croissante dans les analyses sur le cycle de vie, car la taille des usines de production de biocarburants augmente et les matières de base doivent être acheminées à partir de régions de plus en plus éloignées. Par exemple, plusieurs grandes usines installées sur le Golfe du Mexique font venir du maïs en train depuis le Middle West. De plus, les matières de base résiduelles destinées à l'alimentation animale (drêches de distillerie) doivent fréquemment être transportées sur de longues distances jusqu'aux fermes d'élevage.

Plus généralement, les moyennes présentées dans le schéma 1 et tirées des différentes études originales masquent une très grande diversité de résultats au niveau des sites de production.

L'une des évaluations les plus récentes et les plus complètes consacrées aux effets des biocarburants sur l'environnement a été réalisée par l'Empa Research Institute pour le compte de l'administration suisse (Zah *et al.*, 2007). Ont été élaborés à cet effet des indicateurs très

complets relatifs aux répercussions environnementales, ainsi que des évaluations concernant les émissions de GES pour l'ensemble du cycle de vie d'un grand nombre de biocarburants et de systèmes de production. Les travaux ont porté sur les biocarburants produits dans différents pays. L'étude est partie de l'hypothèse que les biocarburants devaient être utilisés en Suisse, mais étant donné que la contribution du transport des carburants finis à l'émission de GES est relativement faible, cela n'a qu'une incidence minime sur les chiffres.

Les résultats présentés dans les schémas 2 et 3 illustrent l'importance des émissions enregistrées pendant la phase de culture pour déterminer le volume total de gaz à effet de serre, de même que la teneur en carbone de la matière organique rendue à la terre après la récolte.

Schéma 2. Comparaison des émissions de gaz à effet de serre, par type d'opération, au cours des processus de production et de distribution de biocarburants et de produits pétroliers.

Légende:

Biodiesel : 100 % EM de colza CH – 100 % EM de colza RER – 100 % EM d'huile de palme MY – 100 % EM d'huile de soja US – 100 % EM d'huile alimentaire usagée CH – 100 % EM d'huile alimentaire usagée FR

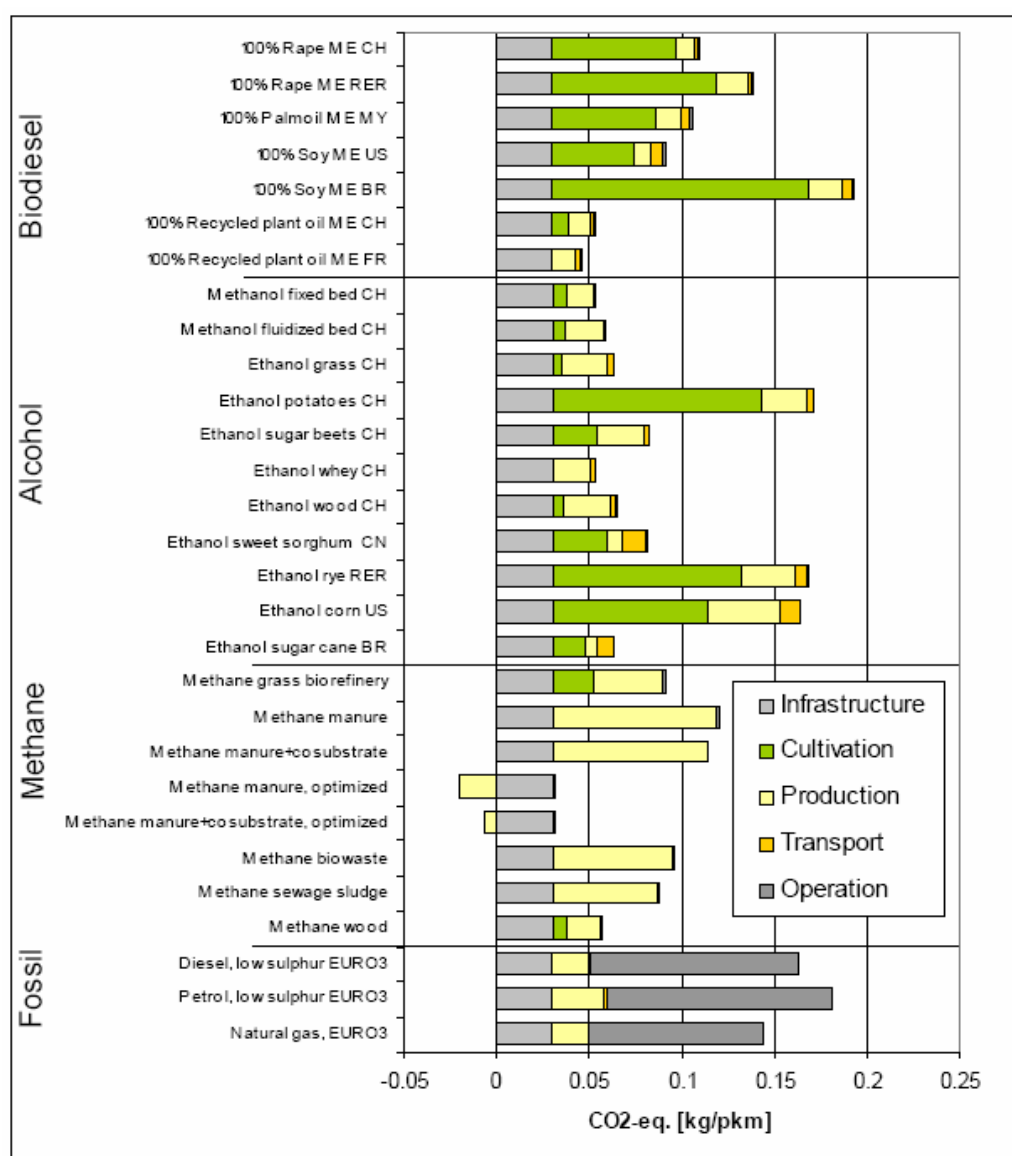
Alcool : Méthanol en lit fixe CH – Méthanol en lit fluide CH – Ethanol d'herbe CH – Ethanol de pommes de terre CH – Ethanol de betterave sucrière CH – Ethanol de lactosérum CH – Ethanol de bois CH – Ethanol de sorgho CN – Ethanol de canne à sucre BR

Méthane : Méthane d'herbe de bio-raffinerie – Méthane de lisier – Méthane de lisier + co-substrat – Méthane de lisier optimisé – Méthane de lisier + co-substrat optimisé – Méthane de déchets biologiques – Méthane de boues d'épuration – Méthane de bois

Fossile : Diesel à base teneur en

soufre EURO3 – Essence à basse teneur en soufre EURO3 – Gaz naturel EURO3

Petit encadré : Infrastructures – Culture – Production – Transport – Exploitation



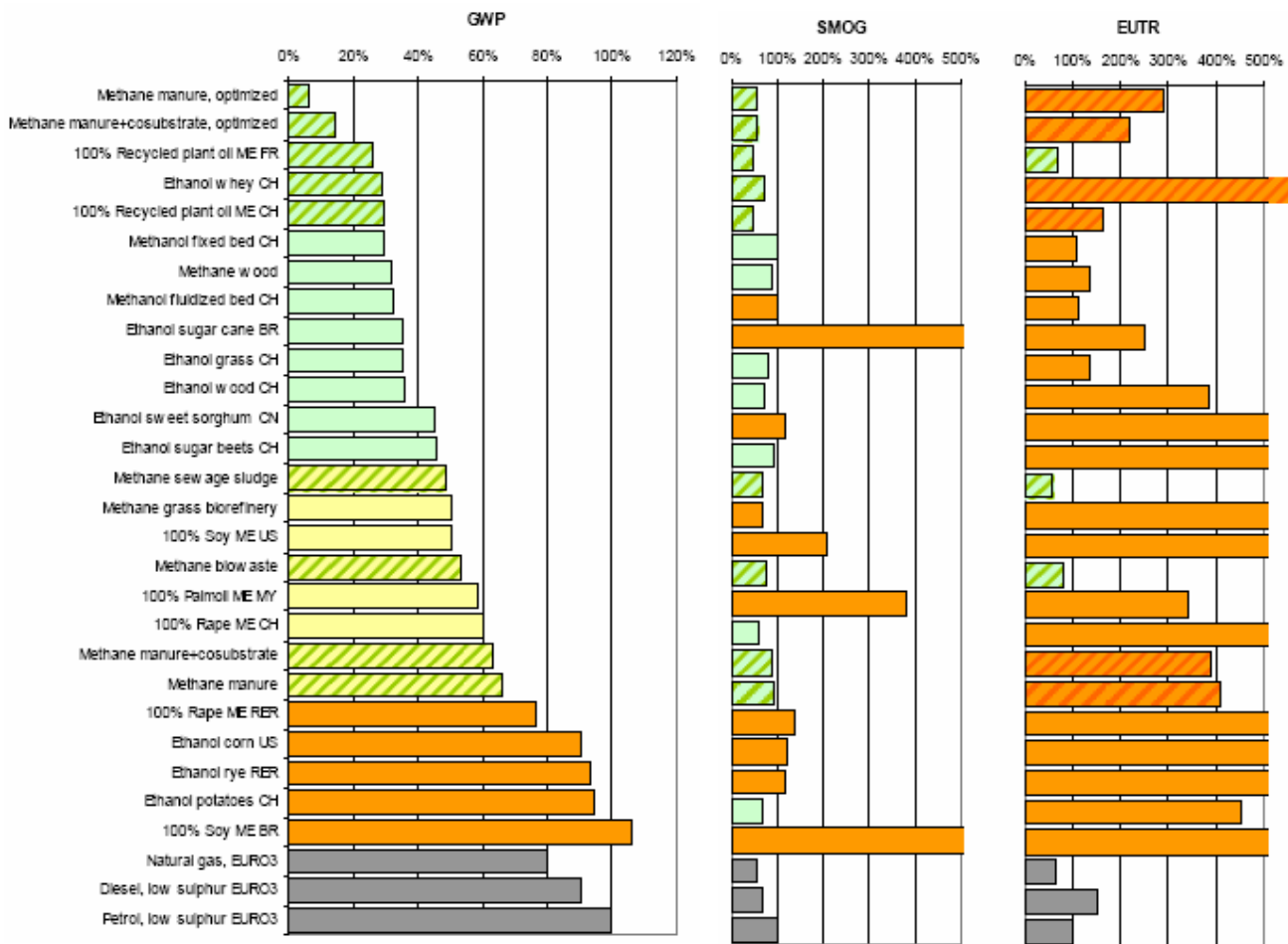
Notes: L'utilisation de véhicules est neutre du point de vue des émissions de CO₂ pour les carburants non mélangés, car le CO₂ émis lors de la combustion est absorbé pendant la croissance des plantes.

Le potentiel de réchauffement global est exprimé ici en kilogrammes d'équivalent CO₂ par kilomètre-passager, sur la base d'un facteur de chargement de 1,59 passagers par véhicule. Les chiffres relatifs aux infrastructures tiennent compte des émissions pendant les phases de production et de maintenance du véhicule et de la route.

RER = Union européenne.

Source: Zah et al. 2007.

Schéma 3. Ecobilan des biocarburants pour l'ensemble du cycle de vie par rapport aux carburants fossiles de référence.



Légende

Méthane de lisier optimisé – Méthane de lisier + co-substrat optimisé – 100% EM d'huile alimentaire usagée FR – Ethanol de lactosérum CH – 100% EM d'huile alimentaire usagée CH – Méthanol lit fixe CH – Méthanol de bois – Méthanol lit fluide CH – Ethanol de canne à sucre BR – Ethanol d'herbe CH – Ethanol de bois CH – Ethanol de sorgho CN – Ethanol de betterave sucrière CH – Méthane de boues d'épuration – Méthane d'herbe de bio-raffinerie – 100 % EM d'huile de soja US – Méthane de déchets biologiques – 100 % EM d'huile de palme MY – 100% EM de colza CH – Méthane de lisier + co-substrat – Méthane de lisier – 100% EM de colza RER – Ethanol de maïs US – Ethanol de seigle RER – Ethanol de pommes de terre CH – 100% EM d'huile de soja BR – Gaz naturel EURO3 – Diesel à basse teneur en soufre EURO3 – Essence à basse teneur en soufre EURO3

Notes: GWP = potentiel de réchauffement dû aux GES, SMOG = potentiel de smog estival, EUTR = surfertilisation. RER = Union européenne.

Les biocarburants sont classés en fonction de la réduction des émissions de GES. Dans le diagramme de gauche, les émissions inférieures de plus de 50 % à celles des carburants issus du pétrole sont indiquées en vert, celles dont la réduction est comprise entre 30 % et 50 % sont en jaune et celles qui sont inférieures de moins de 30 % apparaissent en orange. Dans les deux autres diagrammes, les significations sont les suivantes : vert = mieux que la référence, orange = moins bien que la référence. Rayures = filières de production utilisant des résidus ou des déchets.

Source: Zah et al. 2007.

L'étude de l'EMPA confirme plusieurs des points observés par Farrell *et al.* :

- diversité considérable des performances, sous l'angle des émissions de GES, selon les carburants et les matières de base ;
- l'éthanol de maïs et l'éthanol produits à partir de seigle et de pommes de terre ne présentent aucun avantage à cet égard ;
- l'éthanol lingo-cellulosique produit à partir d'herbes et de bois ouvre des perspectives potentiellement beaucoup plus intéressantes de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

L'étude relève en outre les bonnes performances, en la matière, de l'éthanol produit de lactosérum et des biocarburants produits à partir d'huiles végétales recyclées. Les autres carburants dont l'intérêt est indiscutable en termes d'émissions de GES (réduction supérieure de plus de 50 % par rapport à l'essence ou au diesel) sont les suivants : éthanol de canne à sucre brésilienne, éthanol de sorgho canadien et éthanol de betterave sucrière. Les biodiesels produits à partir de soya des Etats-Unis, d'huile de palme de Malaisie et de colza de Suisse donnent également d'assez bons résultats, avec des émissions de GES de 30 à 40 % inférieures à celles du diesel conventionnel. D'après l'étude, le biodiesel extrait du colza dans l'Union européenne affiche des performances moins bonnes (100 % EM de colza RER dans le schéma 3).

Incertitudes

Les discussions tenues lors de la Table Ronde ont confirmé qu'il subsistait de nombreux points d'interrogation quant au bilan énergétique des biocarburants et aux émissions de GES pour l'ensemble de leur cycle de vie. La plupart de ces incertitudes se rapportent à la production de matières de base, alors que la transformation de ces dernières en carburant, beaucoup mieux maîtrisée, est plus facilement mesurable.

La quasi-totalité des biocarburants sont actuellement produits sur des terres fertiles, et peuvent donc rivaliser avec d'autres productions agricoles. De l'avis de nombreux participants à la Table Ronde, les incertitudes concernant les gaz à effet de serre émis par ce type de biocarburant sont telles qu'il est impossible de tirer des conclusions fermes quant aux avantages et aux inconvénients qu'ils présentent sur le plan climatique.

D'autres participants sont parvenus à la conclusion que ces importants éléments d'incertitude ne portent que sur quelques paramètres (principalement les modifications dans l'affectation des sols et les émissions d'oxyde nitreux) et que les fourchettes d'émissions sont tout à fait quantifiables. Selon eux, pour ce qui concerne les biocarburants dont l'intérêt est limité en termes d'émissions de GES (comme l'éthanol de maïs), les incertitudes suffisent pour affirmer que ces émissions pourraient bien en fait s'avérer supérieures à celles de l'essence. Toutefois, la plupart des biocarburants permettent une réduction nette de ces émissions, même si elles restent parfois limitées.

Une étude récente de Tad Patzek, s'appuyant sur une estimation de l'impact des modes classiques de culture du maïs aux Etats-Unis, observe que les émissions causées par l'oxydation de l'humus dans des sols érodés par le vent pourrait être la deuxième composante des émissions liées à la production d'éthanol de maïs, après celles du carburant employé pour le processus de bioraffinage (Patzek 2007). De nouvelles recherches scientifiques seront

indispensables, afin de disposer de chiffres propres aux autres cultures et pratiques agricoles. Le recours à de nouvelles cultures et à de nouvelles méthodes pourrait limiter considérablement les émissions de GES, ainsi que d'autres effets sur l'environnement.

L'écart entre les émissions de gaz à effet de serre les plus élevées et les plus faibles dans les analyses de Farrell et de l'équipe ERG s'explique en grande partie par les différences supposées dans les quantités de chaux utilisées pour la culture du maïs ; les auteurs ont d'ailleurs souligné que les données disponibles sur ce point étaient très médiocres.

Les incertitudes qui ressortent de l'analyse des émissions de GES produites par les carburants pendant leur cycle de vie concernent essentiellement l'évolution des modes d'exploitation des sols. Les changements liés à la production de biocarburants peuvent modifier considérablement la proportion de carbone dans la biomasse et dans le sol. Il est vrai que les niveaux de carbone sont très variables, mais les sols des forêts, des marécages et des prairies en contiennent sensiblement plus, de manière générale, que les terres agricoles normales (Delucchi 2006). Convertir des forêts ou des prairies en terres agricoles dans le but de cultiver des plantes transformables en biocarburants peut donc provoquer des émissions de carbone équivalentes à plusieurs décennies d'utilisation de carburants fossiles.

Autre source majeure d'incertitude : le volume d'oxyde nitreux (N_2O) rejeté par les sols cultivés ou produit indirectement par l'application d'engrais, qui peut représenter jusqu'à 50 % du total des émissions de GES dues à la production de certains biocarburants, en équivalents CO_2 . Selon un rapport établi récemment pour l'Agence allemande de l'environnement, mais non publié, lorsque les émissions de N_2O sont prises en compte, le biocarburant produit à partir du colza en Allemagne émet trois fois plus de GES que le diesel conventionnel. Mark Delucchi, de l'Université de California Davis, est parvenu à des résultats similaires pour le biodiesel de soya produit aux Etats-Unis (Delucchi 2006).

Les pratiques agricoles jouent un rôle déterminant en matière de GES, le choix de « bonnes » ou de « mauvaises » pratiques pouvant suffire à faire pencher la balance du côté positif ou négatif. La nature des sols a également son importance. On estime que les sols cultivés riches en humus, majoritaires dans le nord de l'Europe, produisent des émissions de gaz à effet de serre une centaine de fois supérieures à celles des terres plus minérales qui caractérisent l'Espagne ou les principales zones de culture de canne à sucre au Brésil. Le rendement des terres a aussi des conséquences non négligeables sur le bilan énergétique et les émissions de GES des biocarburants au cours de leur cycle de vie.

Impact sur l'écosystème

L'utilisation de déchets comme matière première pour la production de biocarburants permet d'éviter un grand nombre de problèmes liés à la culture de plantes spécifiquement destinées à cette production. Dans le même temps, la plupart des déchets agricoles s'accompagnent d'un coût de substitution et l'agriculture durable préfère les rendre à la terre afin de conserver la teneur en matière organique. Dans l'état actuel des choses, les pratiques agricoles entraînent une baisse rapide des niveaux d'humus dans de nombreuses régions du monde. L'extraction de paille, de lisier ou de toute autre biomasse en vue d'une production à très grande échelle de carburants ligno-cellulosiques risquerait, suivant les quantités de résidus prélevées, d'accentuer encore cette tendance.

Lorsque la gestion des quantités excessives de lisier produites par l'agriculture intensive devient problématique, la conversion en biocarburant présenterait des avantages, encore qu'il

soit difficile de faire une comparaison avec les résultats que donnerait une agriculture moins intensive. De façon plus générale, on pourrait s'attendre à ce que la transformation en biocarburants de déchets qui, autrement, seraient déversés dans des décharges bénéficie à l'environnement puisque les décharges adaptées ne sont pas suffisamment nombreuses.

Les participants à la Table Ronde ont abordé brièvement la possibilité d'utiliser, pour la production de matières de base transformables en biocarburants, des terrains dégradés que les exploitants n'utilisent généralement plus à des fins agricoles. Cette pratique n'est guère répandue actuellement ; lorsque des sols abîmés ont effectivement été convertis à la production de biocarburants – comme certaines terres concernées par le Programme de mise en réserve des terres fragiles (*Conservation Reserve Program*) aux Etats-Unis – ce sont généralement des cultures traditionnelles, comme le maïs, qui ont été retenues, causant tous les problèmes évoqués précédemment. Des solutions de remplacement ont été proposées, afin de mettre en place des cultures pérennes qui permettraient de rétablir la qualité des sols et d'y piéger le carbone tout en produisant des biocarburants, grâce à l'utilisation d'espèces existantes comme l'herbe de prairie ou de plantes génétiquement modifiées transformables en biocarburants (par exemple : herbe à éléphant, ou *miscanthus*). De telles approches n'ont pas encore fait leurs preuves ; elles ne permettraient qu'une production limitée de biocarburants, en raison du rendement relativement faible de ces sols et de ces matières de base.

Le classement de la quasi-totalité des biocarburants dans la catégorie des énergies « renouvelables » a été fondamentalement contesté. En effet, la transformation de la biomasse en carburant nécessite de prélever de la matière dans les écosystèmes naturels (lorsque ce sont des plantes ou des arbres sauvages qui sont convertis), de remplacer un écosystème par des cultures ou d'intensifier la production d'une exploitation agricole existante. Le résultat net, comme pour de nombreuses exploitations modernes, implique donc la destruction d'écosystèmes, une perte de biodiversité et un appauvrissement des écosystèmes des terres modifiées : autant de dégradations irréversibles, sauf à se placer dans une perspective géochronologique. Tout accroissement de la production de biomasse s'accompagnerait d'une consommation de ressources impossibles à remplacer. Même avec les niveaux actuels de production de biocarburants, ces pertes ne sont pas anodines. Dans une optique à très long terme, on a fait remarquer que la production de biocarburants à grande échelle n'était pas « durable » et que les biocarburants ne pouvaient être considérés comme « renouvelables » (voir Patzek 2007a pour un examen plus approfondi de cette question). Il en va naturellement de même du caractère « renouvelable » de nombreux produits alimentaires.

4. Subventions, rentabilité des politiques d'aide aux biocarburants et répercussions indirectes sur l'économie.

Le débat a été lancé par un exposé de Ron Steenblik, Directeur de recherche pour le projet « Global Subsidies Initiative » de l'Institut international du développement durable, qui a examiné notamment :

- le volume et la portée des subventions ;
- les perspectives de viabilité commerciale compte tenu des prix du pétrole et des matières de base ;
- les interactions des marchés et l'impact des subventions aux biocarburants sur le marché des produits alimentaires et des matières premières destinées à l'alimentation animale.

Il a d'abord fait observer que l'on pourrait sans doute se dispenser d'une évaluation complexe et coûteuse des performances des biocarburants en vue de leur certification si ces derniers ne bénéficiaient pas de subventions toujours plus importantes et si l'on s'abstenait de fixer des objectifs quantitatifs pour leur production. Les biocarburants actuellement produits sans aides publiques directes ou indirectes sont rares, voire inexistantes.

Aux Etats-Unis, le dégrèvement fiscal accordé par l'Administration fédérale en fonction du volume de production de biocarburants devrait coûter quasiment 4 milliards d'USD au contribuable en 2007 (tableau 1), soit l'équivalent d'un tiers des 12 milliards que représenteront en principe les subventions agricoles de cette année. Les crédits d'impôts octroyés au plan fédéral pour encourager les biocarburants pourraient passer à 16 milliards d'USD si le Congrès américain adopte la proposition de l'Administration Bush de porter à 132 milliards de litres, d'ici à 2017, l'objectif de production annuelle de combustibles de substitution (schéma 5).

Dans l'Union européenne, on estime que la réduction des droits d'accise sur les biocarburants a représenté un manque à gagner fiscal d'environ 3 milliards d'euros (4 milliards d'USD) en 2006, contre 1,8 milliard d'euros en 2005 (Kutas *et al.*, 2007).

Tableau 1. Estimations concernant les principales exonérations fiscales accordées aux biocarburants aux Etats-Unis en 2007

(milliards d'USD)

	Allègements fiscaux accordés aux « mélangeurs » par l'Etat fédéral (manque à gagner fiscal dû à l'allègement des droits d'accise en fonction du volume de production)	Crédits d'impôt accordés aux petits producteurs au niveau fédéral	Exonérations de droit d'accise sur les carburants au niveau des Etats	Total
Ethanol	3.2	0.1	0.2	3.5
Biodiesel	0.5	0.1	0.1	0.7
Total	3.7	0.2	0.3	4.2

Source: Koplow, 2007.

Tableau 2. Estimations concernant les principales exonérations fiscales dans l'Union européenne

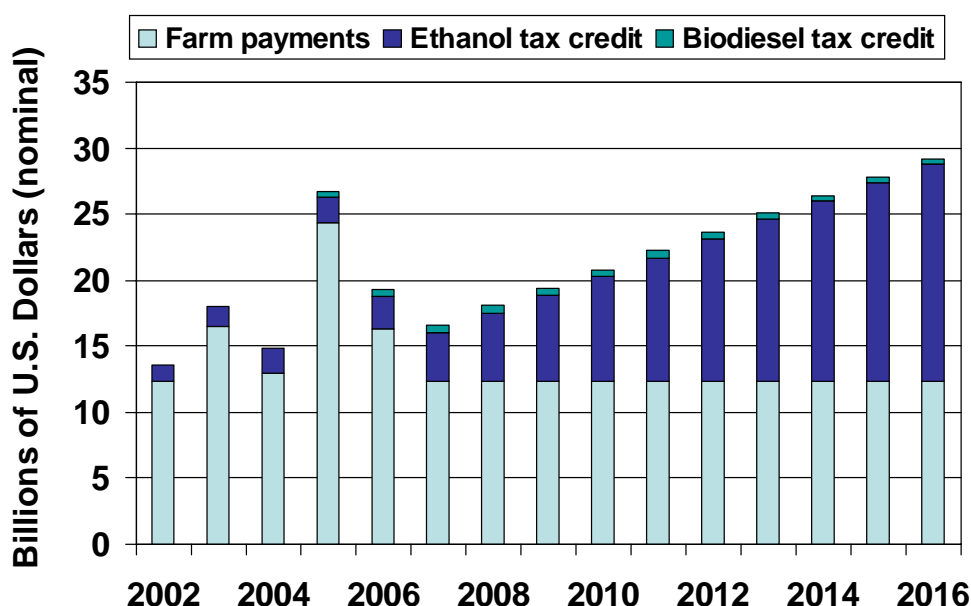
(Exonérations de droit d'accise – manque à gagner fiscal)

	2005		2006	
	Milliards d'euros	Milliards d'USD	Milliards d'euros	Milliards d'USD
Ethanol	0.5	0.7	0.8	1.2
Biodiesel	1.3	1.8	2.1	3.0
Total	1.8	2.5	3.0	4.1

Notes: Euros en prix courant. Conversion des euros en dollars au taux interbancaire en vigueur le 12 septembre 2007.

Source: Kutas *et al.*, 2007.

Schéma 5. Aides à l'agriculture et allègements fiscaux sur les biocarburants aux Etats-Unis: prévisions



Légende : Aides agricoles – Allègements fiscaux sur l'éthanol – Allègements fiscaux sur les biocarburants

A gauche : Milliards d'USD (valeur nominale)

Note: Projection basée sur l'objectif fixé par l'Administration Bush (35 milliards de gallons, ou 131 milliards de litres d'éthanol) pour 2017, en supposant que les aides agricoles demeurent constantes en valeur nominale ; la forte hausse du montant des subventions en 2005 était due aux mesures de soutien des prix et aux paiements compensatoires suscités par l'effondrement du prix des cultures suite au passage de l'ouragan Katrina.

Source: Etabli par Ron Steenblik, de la Global Subsidies Initiative, pour les besoins du présent rapport.

Pour l'ensemble de l'OCDE, M. Steenblik estime que l'ensemble des mesures de soutien aux biocarburants représentera de 13 à 15 milliards d'USD en 2007.

Il existe des moyens beaucoup moins onéreux d'économiser le carburant et de réduire les émissions de CO₂ dans le domaine des transports et dans d'autres secteurs de l'économie. En faisant abstraction des cas où l'utilisation de l'éthanol augmente les émissions de GES au lieu de les réduire, on a estimé que les mesures de soutien à ce carburant coûtaient 520 USD (soit 390 euros) pour les GES non émis grâce à la production d'éthanol dans les usines américaines les plus performantes³. Le coût de la réduction des GES dépasse 10 000 USD par tonne d'équivalent CO₂ (7 400 euros) dans l'hypothèse d'une production d'éthanol dans l'Oregon à partir de matières premières acheminées depuis le Middle West. Il est inconcevable, à de tels niveaux de coût, que le recours aux analyses du cycle de vie afin d'améliorer même les meilleures usines américaines de production d'éthanol et les méthodes de production de maïs puissent faire de l'éthanol un outil de réduction des GES plus rentable que d'autres solutions, comme les aides à l'efficacité énergétique des véhicules.

³ Sont prises en compte les différentes aides fournies par l'Administration fédérale et par les Etats : taxes à l'importation, allègement des droits d'accise en fonction du volume de production, exemption de droits d'accise dans certains Etats, crédits d'impôt sur les sociétés, subventions d'investissement, etc.

Il en va de même, d'après les travaux menés dans le cadre de la Global Subsidies Initiative (Kutas *et al.*, 2007), pour les biocarburants produits en Europe, bien que les réductions de GES soient nettement plus importantes que celles permises par l'éthanol de maïs américain. S'agissant de l'éthanol issu de la betterave sucrière en Europe, on estime que le coût des subventions par tonne d'équivalent CO₂ non émise se situe entre 450 et 620 euros ; pour le biodiesel produit à partir du colza, le coût est compris entre 750 et 990 euros, et il avoisine 270 euros (370 USD) pour le biodiesel dérivé d'huiles alimentaires usagées.

Tableau 3. Coût des mesures d'atténuation de l'effet de serre : subventions par tonne d'équivalent CO₂

Performance moyenne	Euros par tonne d'éq. CO ₂	USD par tonne d'éq. CO ₂
Etats-Unis – éthanol de maïs	390	520
UE – éthanol de betterave sucrière	450 - 620	610 – 840
UE – éthanol de colza	750 - 990	1 000 - 1 340

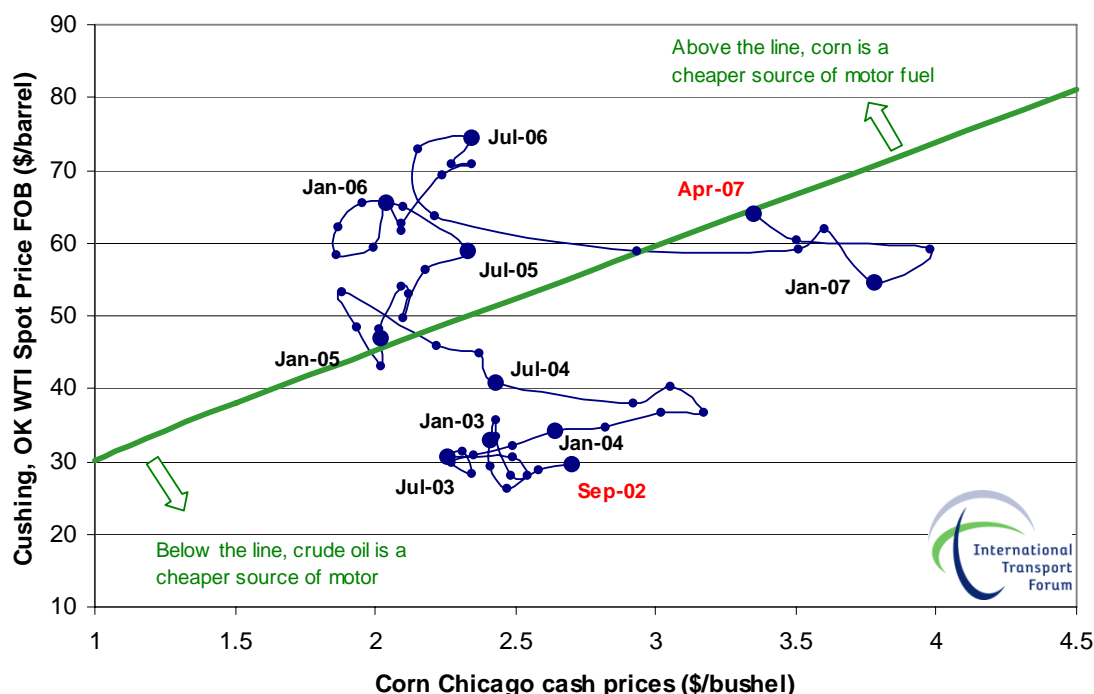
Note Conversions aux taux interbancaires en vigueur le 7 septembre 2007.

Sources: Koplou 2007; Kutas *et al.*, 2007.

Les aides aux biocarburants constituent un moyen extrêmement coûteux de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, la subvention implicite que représente l'exonération de droit d'accise sur le biodiesel de 0,70 euro par litre en Allemagne correspond à une aide de 10 000 euros (13 000 USD) par véhicule sur la base du nombre moyen de kilomètres que parcourt une voiture sur l'ensemble de sa durée de vie. Si ce montant était investi dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules, la consommation moyenne pourrait s'en trouver réduite de façon très spectaculaire.

Dans certains cas, les aides à la production de biocarburants dépassent nettement le prix du carburant fossile auxquels ils se substituent. La Pennsylvanie, par exemple, envisage pour le biodiesel des subventions qui, associées aux aides fédérales, représenteraient 2,37 USD par gallon, alors que le prix avant impôt du gazole d'origine minérale s'élève approximativement à 2,00 USD par gallon. Les carburants fossiles bénéficient eux aussi de subventions, mais les montants par unité produite sont moins élevés. Dans les pays de l'OCDE, des allègements fiscaux encouragent la production pétrolière, mais leur impact sur le prix à la pompe reste limité. (Ce sont principalement les pays membres de l'OPEP, ainsi que quelques pays à faible revenu, qui subventionnent les carburants.)

Schéma 6. Impact des prix du maïs et du pétrole brut sur la compétitivité de l'éthanol de maïs et de l'essence.



Prix du maïs au comptant - Chicago (\$/boisseau)

En vert : Au-dessus de la ligne verte, le maïs est une source moins chère de carburant – En dessous de la ligne verte, le pétrole brut est une source moins chère de carburant.

Data sources : Ministère de l'agriculture des Etats-Unis (prix du maïs) ; Energy Information Administration (prix du pétrole) ; *Break even line*, Tyner 2007.

La production de denrées alimentaires et de fibres reçoit également des subventions généreuses dans de nombreux pays, mais les aides à la production de biocarburants sont particulièrement mal structurées, sans plafond ni prise en compte des performances. On pourrait s'attendre à ce que l'objet de ces aides consiste à rendre les biocarburants compétitifs face aux produits pétroliers ; elles ne sont pourtant que rarement liées au prix du pétrole, et sont maintenues même lorsque ce prix atteint des niveaux susceptibles de rendre les biocarburants compétitifs. Il a été souligné qu'en France, les subventions accordées aux biocarburants sont désormais calculées sur la base d'un prix de 30 USD le baril de pétrole. Le baril ayant atteint 60 USD, le contribuable verse à l'industrie des biocarburants des montants considérables. Si les subventions d'équipements destinées à faciliter la construction de bioraffineries peuvent être suspendues assez facilement, les aides à la production s'avèrent toujours très difficiles à réformer.

Peu de marchés ont été faussés dans les mêmes proportions que celui des biocarburants par l'intervention des pouvoirs publics. Par ailleurs, les aides à la production de biocarburants rendent plus légitimes les demandes de subventions concernant d'autres carburants de substitution. Certains responsables politiques américains, désireux de voir s'installer dans leur Etat de nouvelles usines de liquéfaction du charbon, plaident en faveur d'une subvention sous forme d'un crédit d'impôt (0,51 USD par litre) équivalent à celui dont bénéficie actuellement

l'éthanol. Deux projets de loi ont été présentés au Congrès – puis rejetés -- en juin 2007, dans le but d'instaurer un système d'aide analogue pour la production de carburants dérivés du charbon liquéfié. Cette démarche s'appuie sur la logique selon laquelle tous les carburants présentant les mêmes avantages pour l'environnement ou la sécurité énergétique devraient être subventionnés de la même façon. Ce type de raisonnement induit la multiplication des subventions. Une simple augmentation des droits d'accise, proportionnelle à la teneur en carbone des carburants, constituerait un moyen plus direct, plus limitatif et plus transparent d'encourager le développement des carburants à faible teneur en carbone.

De l'avis de certains, le cas du Brésil prouve que l'octroi de subventions peut être temporaire. La production d'éthanol brésilien est tout près du seuil de viabilité commerciale. Toutefois, ainsi que l'explique en détail le document préparé par M. de Almeida, ce produit est exonéré du droit d'accise sur les carburants, voire même de TVA dans les Etats producteurs de canne à sucre. La production ne serait pas viable sans ces avantages fiscaux. Le coût annuel de ce soutien représente environ 1 milliard d'USD.

L'idée que la production conventionnelle d'éthanol exige le même soutien qu'une industrie naissante est difficilement acceptable, dans la mesure où le mode de production est identique à celui de la fermentation des céréales utilisées pour la fabrication de la bière ou d'autres boissons alcoolisées, un processus exploité commercialement depuis des milliers d'années. Par ailleurs, les Etats-Unis produisent depuis vingt ans de l'éthanol qui sert ensuite à la fabrication de carburants. La nécessité d'encourager l'énergie éolienne avec des subventions de type « industrie naissante » a été soulignée, car le seuil de viabilité commerciale n'est plus très éloigné. Il semble toutefois que l'évolution aille en sens inverse dans le cas des biocarburants : le prix de la terre augmente, tout comme celui des céréales, dont la production a justement bénéficié de subventions.

D'aucuns ont estimé que le manque de produits de substitution pour les hydrocarbures liquides utilisés dans les transports justifiait un soutien particulier au biocarburants ; ce point de vue n'a cependant pas recueilli l'ensemble des suffrages, car il est désormais possible, pour un coût bien moindre, de réduire fortement les émissions de CO₂ et d'économiser du pétrole dans d'autres secteurs. En outre, il est de toute évidence beaucoup moins efficace de transformer la biomasse en molécules hydrocarbonées complexes que de la brûler à des fins de chauffage ou pour produire de l'électricité.

Les aides à la production de biocarburants obéissent à trois objectifs stratégiques :

- réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- amélioration de la sécurité énergétique ;
- promotion des emplois ruraux.

D'autres moyens peuvent contribuer davantage à atteindre ces objectifs, pour un coût nettement moins élevé : promotion de l'efficacité énergétique, élaboration de stratégies de gestion de la demande dans le domaine des transports, soutien direct des revenus agricoles.

L'expérience a prouvé que les aides à la production ne contribuait guère à la mise en œuvre de politiques sociales dans le secteur agricole : la quasi-totalité des avantages, en effet, profite aux grandes sociétés agro-industrielles plutôt qu'aux ouvriers ou aux petits exploitants qu'elles sont censées aider. Il en va de même avec la production de biocarburants, assurée pour l'essentiel par de grosses entreprises.

S'agissant de la sécurité énergétique, la volatilité des prix est généralement un bon indicateur des problèmes liés à la sécurité des approvisionnements. Les prix flambent en cas de pénurie, pour s'effondrer en période de surabondance. Les prix des céréales connaissent des fluctuations plus fortes que ceux du pétrole, notamment parce que les cultures sont tributaires des conditions météorologiques. Dans l'hypothèse même où la totalité des terres cultivables seraient converties à la production de biocarburants, la sécurité énergétique n'en serait pas garantie pour autant et la volatilité des prix pourrait s'en trouver accrue.

Accorder des subventions aux biocarburants peut revenir, du fait de leur coût élevé, à détourner des ressources qui auraient pu contribuer à l'amélioration de mesures d'efficacité beaucoup plus intéressantes en termes de réduction des GES. Globalement, le niveau et la structure actuels de ce soutien vont plutôt à l'encontre de la mise en œuvre de tous types d'objectifs stratégiques.

5. Carburants de deuxième génération – Performances et potentiel

Un débat s'est engagé suite à l'exposé de Mme Birgitte Ahring, de l'Université technique du Danemark, fondatrice de la société BioGasols Company, qui produit de l'éthanol ligno-cellulosique à partir d'une usine pilote danoise. Les points suivants étaient abordés dans cet exposé :

- performances énergétiques, par matière de base et par processus ;
- performances économiques à ce jour ;
- structure des subventions ;
- performances et échelle de production à partir de déchets et de cultures « énergétiques ».

Des usines pilotes d'éthanol ligno-cellulosique sont en cours de mise en place au Danemark : la production devrait démarrer d'ici un an ou deux, au rythme annuel de 10 millions de litres environ pour chacune d'elles. Ces entreprises seront conçues de manière à pouvoir utiliser plusieurs sortes de matières premières, plutôt que de produire du carburant à très faible coût. La prochaine génération de petites usines entièrement équipées, d'une capacité de quelque 70 millions de litres par an, est prévue approximativement pour 2010. Les unités de production à vocation pleinement commerciale seront encore plus importantes – à peu près 100 millions de litres par an – et devraient atteindre le seuil de rentabilité avec un prix de 35 USD par baril de pétrole. Mme Ahring prône néanmoins, dans son document, le maintien des aides à la production.

Selon l'exposé, les frais d'investissement des usines d'éthanol ligno-cellulosique sont supérieurs d'environ 50 % à ceux des unités de production d'éthanol conventionnel ; le facteur essentiel à la viabilité commerciale reste cependant le coût des matières provenant de la biomasse. Le principal ingrédient de base au Danemark sera la paille, en dépit de son prix relativement élevé (85 USD/tonne) ; différentes matières de base devraient cependant être utilisées par la suite, entre autres : vieux papiers, ordures ménagères et fibres résiduelles de lisier de porc. La possibilité de ne pas envoyer les détritiques à la décharge peut s'avérer particulièrement intéressante dans un contexte où les quantités d'ordures ménagères augmentent rapidement. La production de carburants à partir de certains types de déchets réduit à zéro l'impact négatif de l'exploitation des terres sur l'environnement, mais les quantités d'éthanol qui pourraient être produites à partir de ces matières restent à évaluer.

La grande diversité des matières premières susceptibles d'être transformées en éthanol ligno-cellulosique se traduit par des résultats très variables en matière de GES sur l'ensemble du cycle de vie. La probabilité d'obtenir des résultats positifs est meilleure qu'avec l'éthanol conventionnel. S'agissant des usines danoises utilisant la paille, on attend une réduction des émissions de 80 % par rapport à l'essence. On ne dispose pas de chiffres concernant le coût par tonne de CO₂ évitée.

Les investissements relativement substantiels nécessaires à la production d'éthanol ligno-cellulosique supposent la réalisation d'importantes économies d'échelle. Il faudra donc vraisemblablement prévoir, pour assurer la viabilité commerciale du processus, de grandes usines capables de traiter de gros volumes de biomasse. Par conséquent, soit de grandes quantités de matières premières devront être disponibles au plan local, soit il faudra les transporter sur de longues distances jusqu'à l'unité de production. C'est ce qui se passe avec les cultures à faible rendement, comme le panic, qui pousse sur des sols peu productifs. Le transport des matières de base a cependant un coût financier et énergétique, et aggrave sérieusement les émissions de GES liées à ce mode de production de l'éthanol. Il faudrait, afin de produire des quantités d'éthanol suffisantes pour satisfaire plus de 1 ou 2 % des besoins en carburant dans le secteur des transports, des plantations à grande échelle de cultures dédiées sur des sols raisonnablement fertiles. Les rendements par hectare en éthanol dérivé de matières ligno-cellulosiques sont plus élevés que ceux de la production d'éthanol selon des méthodes conventionnelles, car une part plus importante des matières de base est convertie en carburant. Le choix de ce mode de production pourrait donc limiter la pression exercée sur les ressources foncières, avec cependant des coûts plus élevés.

Les drèches de distillerie, co-produit des unités de production d'éthanol conventionnelles, pourraient servir de matière de base à la production ligno-cellulosique (bien que leurs 30 % de protéines et 9 % de matière grasse en fassent plutôt un aliment intéressant pour les animaux) et contribuer à accroître de 20 % la production globale d'éthanol au sein d'un système intégré. Selon Mme Ahring, la transformation de bagasse en éthanol au Brésil permettrait de concurrencer l'essence sans recourir à des allègements fiscaux. Il a été souligné qu'en Australie, la canne à sucre est choisie comme matière de base pour ses feuilles ; le brûlage⁴, en revanche, est moins pratiqué afin de conserver de plus grandes quantités de bagasse.

Une fois encore, un certain nombre de questions ont été soulevées quant au bilan énergétique et matériel de la récupération de certains déchets pour en faire de l'éthanol. Au Brésil, la bagasse sert généralement à l'alimentation des chaudières utilisées pour la distillation de l'éthanol ; la co-production d'éthanol, en utilisant la bagasse pour fabriquer de l'éthanol ligno-cellulosique, sacrifierait les recettes de la vente d'électricité au réseau tout en faisant appel à d'autres combustibles (fossiles) pour fournir la chaleur et l'électricité nécessaires. Quant à la paille, normalement réintroduite dans les sols, son utilisation en grandes quantités pour produire de l'éthanol serait préjudiciable à la qualité de la terre.

Il semblerait que l'avenir reste incertain en ce qui concerne les possibilités d'exploitation commerciale de la première usine-pilote au monde pour la production à grande échelle d'éthanol ligno-cellulosique -- l'usine logen, au Canada. Certains ont évoqué le risque qu'une entreprise pionnière comme celle de logen ne s'avère pas concluante à long terme. Plusieurs petites sociétés privées s'emploient à mettre au point de nouvelles enzymes susceptibles de réduire les coûts, et le coût des enzymes elles-mêmes évolue à la baisse. Les Etats-Unis mettent actuellement à l'épreuve une technique qui consiste à introduire des algues dans des

⁴ Le brûlage facilite la récolte et nettoie les champs des serpents et autres animaux nuisibles.

réservoirs contenant du dioxyde de carbone provenant de centrales alimentées par des combustibles fossiles. Sans éliminer le CO₂, cette méthode permet tout de même une production supplémentaire d'énergie par photosynthèse. La prudence a été recommandée quant à la possibilité de voir la bio-ingénierie améliorer radicalement l'efficacité de la production de biocarburants. Si les enzymes se sont montrées plus performantes que les catalyseurs chimiques en termes de sélectivité, c'est au détriment de la rapidité et de l'efficacité thermique, pour lesquelles les catalyseurs conservent l'avantage.

Les subventions modestes aux innovations techniques sont jugées utiles dans l'ensemble, puisqu'elles contribuent à soutenir la recherche sur des carburants de deuxième génération faisant appel à des technologies novatrices. Pourtant, certains de ces biocarburants se révèlent contre-productifs. La transformation de bois en liquides par le processus de liquéfaction de la biomasse présente un taux d'efficacité de 50 %, alors que brûler le bois directement dans une chaudière puissante permet d'atteindre un taux de 80 %. ; 30 % de la teneur énergétique du bois est perdue s'il est liquéfié plutôt que brûlé. Le remplacement du fioul par le bois pour le chauffage industriel et domestique permettrait de disposer d'un carburant pour moteurs diesel quatre fois plus efficace qu'un biocarburant.

D'autres carburants pourraient éventuellement être produits au moyen de technologies de deuxième génération, comprenant d'autres alcools (p. ex. : le biobutanol), des hydrocarbures et de l'hydrogène. Ces solutions de remplacement n'ont pas été examinées en détail lors de la Table Ronde ; différentes options devront toutefois être étudiées.

6. Possibilités d'exportation de l'éthanol brésilien

C'est M. Edmar de Almeida, de l'Institut d'Economie de l'Université fédérale de Rio De Janeiro, qui lance la discussion, plus particulièrement sur les points suivants :

- résultats de la production actuelle ;
- questions environnementales ;
- volume potentiel des exportations ;
- conséquences de l'augmentation de la production en vue d'une exportation en matière d'énergie, d'environnement et de performances économiques ;
- commerce et obstacles aux échanges.

Dans son document, M. de Almeida analyse de manière approfondie les performances de l'éthanol et du biocarburant brésiliens ; il s'intéresse notamment au bilan énergétique et à celui des émissions de CO₂, à l'évaluation quantitative des subventions, et aux conséquences directes et indirectes de la production de biocarburants sur l'environnement. Le débat porte principalement sur l'éthanol, ce qui illustre l'importance relative de l'éthanol et des biocarburants au Brésil.

D'après les études les plus complètes menées sur l'éthanol au Brésil, sous la conduite de M. de Macedo, l'éthanol dérivé de la canne à sucre permet une diminution des GES de 30 à 80 % par rapport à l'essence, suivant le degré d'efficacité de la production de matières premières et du fonctionnement des usines (les performances se situent d'ailleurs, la plupart du temps, dans la partie supérieure de la fourchette). Ayant examiné attentivement les publications consacrées à ce sujet, M. Almeida peut confirmer que l'éthanol brésilien donne de meilleurs

résultats, sans toutefois être en mesure d'évaluer l'ensemble des incertitudes évoquées précédemment concernant ces estimations. L'éthanol brésilien présente les avantages suivants :

- le sucre est une matière de base plus intéressante que l'amidon (de céréale), ce dernier devant d'abord être broyé dans du sucre avec des enzymes avant de fermenter, ce qui nécessite de la chaleur ;
- l'utilisation de la bagasse (résidu de canne à sucre) pour produire de la chaleur et de l'électricité industrielles permet d'éviter l'emploi de carburants fossiles ;
- la cogénération d'un surplus d'électricité, qui sera ensuite vendu au réseau, améliore à la fois les bilans financier et énergétique ;
- quelques uns au moins des sols utilisés pour la culture de la canne à sucre au Brésil sont pauvres en matières organiques et libèrent peu de N₂O et de CO₂ pendant leur exploitation ;
- les plantations de canne à sucre sont rarement irriguées au Brésil, ce qui réduit la nécessité de pomper de l'eau et, partant, allège la pression sur les ressources aquifères ;
- la main-d'oeuvre agricole est bon marché, ce qui facilite les bonnes performances financières ;
- la poursuite de recherches financées par l'Etat dans le domaine de la sélection des plantes a amélioré le rendement de façon sensible, une tendance qui devrait se poursuivre.

Le prix de l'éthanol a toujours été étroitement lié à celui du sucre, en raison de la facilité avec laquelle les producteurs peuvent passer de l'un à l'autre. Toutefois, les augmentations du prix du pétrole tirent vers le haut celui de l'éthanol, car les deux sont de plus en plus liés.

Peu de documents traitent des effets indirects potentiels que la culture de la canne à sucre, dont l'expansion entraîne la délocalisation de certaines cultures, peut avoir sur les émissions de GES. Ces effets sont probablement bien réels, du fait des interconnexions entre les marchés fonciers. Le développement des plantations de canne à sucre sur des terres précédemment réservées à d'autres cultures instaurera une pression en faveur d'une production plus intensive de ces plantes ou de leur culture sur des terres vierges en d'autres endroits du monde si la demande reste inchangée.

Plusieurs facteurs viennent compliquer la situation. Les nouvelles plantations de canne à sucre au Brésil se substituent à l'élevage intensif de bétail, associé à une érosion généralisée des sols. Dans ces conditions, remplacer le bétail par la canne à sucre pourrait réduire les pertes de carbone stocké dans le sol. Autour de Sao Paulo, au cœur même du pays de la canne à sucre, l'élevage se fait parfois à l'intérieur pour permettre à cette culture de s'étendre. Or, les émissions de GES causées par les animaux nourris en étable peuvent, suivant le type de nourriture utilisé, être bien supérieures à celles de troupeaux paissant en liberté. L'impact global du développement de la culture de la canne à sucre sur les GES reste difficile à déterminer. Il est également possible que certains élevages aient été déplacés vers le Nord, où ils empiètent sur la forêt tropicale. Le principal responsable de la déforestation en Amazonie est

l'exploitation du bois, dont la valeur marchande est très élevée. L'élevage, en revanche, rapporte très peu – environ 100 USD par hectare et par an – et s'installe simplement dans les régions dont les ressources en bois ont déjà été exploitées, légalement ou non.

Le lien entre déforestation et production de biocarburants est peut-être plus marqué dans le cas du soja, dont la culture est mieux adaptée aux conditions prévalant dans le Nord du pays et s'étend sur de très vastes superficies. La production de soja a connu un développement rapide ces dernières années en raison d'une demande croissante au plan international. Son expansion n'est pas sans rappeler le développement initial des plantations de canne à sucre, cause d'une déforestation massive voici quelques siècles. Certes, le gouvernement brésilien a adopté des lois visant à protéger la forêt tropicale amazonienne, mais il est difficile d'en assurer l'application sur les territoires du Nord, vastes et peu peuplés.

Les aides à la production de biocarburants au Brésil avaient au départ pour objectif de fournir des emplois à la main-d'œuvre non qualifiée des zones rurales et de lutter contre la pollution de l'air dans ces régions. (L'éthanol améliore l'indice d'octane dans l'essence sans plomb, ainsi que l'oxygénation des carburants, afin de limiter les émissions de monoxyde de carbone.) Bien que la mécanisation des activités réduise peu à peu les possibilités d'emploi dans les plantations de canne à sucre, ce secteur fournit tout de même un million d'emplois, mieux rémunérés que la moyenne des emplois ruraux. Le soutien à la production de biodiesel obéit à des motivations similaires. Le premier objectif consiste à favoriser le développement rural en encourageant une production à petite échelle dans les régions pauvres. Par ailleurs, le biodiesel ne contenant pas de soufre, il peut être mélangé à du diesel conventionnel afin de réduire les émissions de dioxyde de soufre et de particules, à l'origine des grands problèmes de santé liés à l'environnement que connaissent les principales villes brésiliennes. Aucune analyse n'a cependant cherché à déterminer si les aides aux biocarburants aident efficacement le développement rural.

Commerce de biocarburants

Le débat sur le commerce des biocarburants a fait suite à un court exposé de Ron Steenblik, qui a jugé importante la distinction entre le traitement commercial du biodiesel et celui de l'éthanol. L'Organisation mondiale des douanes classe le biodiesel dans la catégorie des produits chimiques, ce qui lui permet de bénéficier de tarifs douaniers peu élevés. L'éthanol, par contre, est considéré par l'Organisation comme un produit agricole au même titre que la plupart des ingrédients entrant dans la composition de boissons, ce qui l'expose à des droits de douane nettement supérieurs. Les taxes à l'importation varient considérablement entre les différents pays de l'OCDE, de 6 % au Canada à 51 % en Australie (base *ad valorem*). Les États-Unis et l'Union européenne prélèvent des droits représentant respectivement 23 % et 38 % de la valeur des marchandises. Lors des négociations tenues dans le cadre de l'OMC sur l'accès aux marchés des produits agricoles, la diplomatie commerciale relative aux produits compatibles avec la protection de l'environnement n'a porté que sur le biodiesel ; or, ce dernier ne figure plus désormais sur la liste de tels produits. Les négociateurs sont peu enclins à aborder la question de l'éthanol, convaincus que les demandes se multiplieraient inévitablement en vue de faire bénéficier de nombreux produits agricoles d'un traitement spécial.

Les possibilités d'exportation de l'éthanol brésilien sont fortement limitées par les politiques en matière de taxes douanières. Les deux milliards de litres que le Brésil expédie chaque année vers les États-Unis passent, pour l'essentiel, par les pays d'Amérique centrale et des Caraïbes, afin de bénéficier de l'accord conclu au titre de l'Initiative de la zone des Caraïbes. Un développement important nécessiterait la négociation de tarifs favorables. Certains ont émis

l'avis que l'éthanol pourrait contribuer à susciter la réouverture des négociations de l'OMC, actuellement au point mort, mais aucun pays ne semble prêt à modifier sa position actuelle.

7. Certification – possibilité de lier les politiques de soutien aux performances

Des programmes de certification ont été élaborés pour différents produits agricoles et forestiers, afin de distinguer ceux qui respectent un certain nombre de normes environnementales de ceux qui ne le font pas. L'étiquetage des produits alimentaires bio est un exemple fréquemment cité. Certains de ces programmes sont mis en œuvre par les pouvoirs publics, d'autres par des associations de consommateurs ou de producteurs. Tous ont pour but d'instaurer la confiance dans la fiabilité de la caution qu'ils fournissent. Il faut pour cela un système d'assurance de qualité qui définisse les normes à respecter, procède à des inspections dans les exploitations et les usines afin de vérifier la conformité aux normes, et accrédite un certain nombre d'organismes indépendants qui pourront délivrer des certificats attestant que les producteurs concernés satisfont aux critères. La confiance dans l'intégrité de ce système pourra s'appuyer sur le contrôle du gouvernement, l'engagement de groupes de défense de l'environnement et la mise à disposition du public de rapports sur les inspections et la définition des normes.

Le débat sur la certification l'évaluation des biocarburants a été précédé d'un résumé de la situation en Californie, présenté par M. Alex Farrell, et d'un exposé détaillé de M. Jeremy Woods, de l'Imperial College de Londres, qui a abordé les aspects suivants :

- conception des programmes de certification et d'assurance ;
- impacts sur l'environnement de la culture de la biomasse ;
- programmes nationaux et internationaux de certification ;
- faisabilité et rapport coût-efficacité des audits et inspections.

Les deux interventions ont souligné l'extrême diversité des performances, en termes d'émissions de GES, des différents modes de production de biocarburants. Quelque 130 combinaisons matière de base/ traitement ont été évaluées à ce jour. Pour n'en citer qu'une, à savoir la production d'éthanol à partir du blé, les recherches révèlent des écarts considérables dans les résultats : de 80 % de réduction des GES par rapport à l'essence à des émissions plus importantes, pour l'ensemble du cycle de vie.

Comme indiqué précédemment, on comprend très mal le rôle du carbone piégé dans la terre. Cela vaut aussi bien pour la teneur en carbone des écosystèmes naturels par comparaison avec les sols cultivés (par exemple : lorsque des tourbières sont nettoyées ou des marécages asséchés pour laisser la place à des cultures transformables en biocarburants) que pour l'impact des différentes techniques agricoles sur cette teneur en carbone. Il ressort des travaux menés que de bonnes pratiques agricoles peuvent conduire à augmenter la quantité de carbone présente dans les matières organiques, parfois même lorsque les terres concernées sont des pâturages ou des zones de savane. A l'inverse, des méthodes médiocres peuvent entraîner des émissions de GES considérables et des pertes de carbone dans les sols. Ce sont actuellement les pratiques préjudiciables qui dominent, mais les contrôles aux fins de certification sont coûteux. Dans le même temps, la production de biocarburants ne représente à ce jour qu'un mode d'exploitation de la terre parmi d'autres. A mesure que l'on connaîtra mieux les effets du carbone contenu dans les sols sur les émissions de GES, il faudra revoir

également les estimations concernant les émissions dues à d'autres formes d'utilisation de la terre.

Le processus de certification est difficile, surtout en raison de l'effort nécessaire à l'obtention d'un consensus sur les méthodologies employées et la validité des résultats.

Malgré les difficultés et les lacunes constatées dans le domaine de la recherche, la certification est essentielle pour que les subventions et les objectifs quantitatifs en matière de biocarburants soient maintenus. Sans elle, les objectifs risqueraient de souffrir d'un nivellement par le bas : il s'agirait alors de produire davantage pour un coût et un investissement en biens d'équipement réduits au minimum, ce qui se traduit généralement par des émissions de GES très élevées. Le premier rôle de la certification consiste à enrayer cette tendance.

Face aux objectifs de l'UE concernant les biocarburants, le gouvernement britannique introduira dès avril 2008 l'Obligation d'utilisation de carburants tirés de sources renouvelables (Renewable Transport Fuel Obligation - RTFO), aux termes de laquelle les fournisseurs de carburants devront remettre à l'Administrateur du programme des rapports mensuels sur les teneurs en carbone et la durabilité. Ces rapports indiqueront le type et le volume de biocarburant fourni, en précisant la matière de base, les normes environnementales et sociales éventuellement prises en compte pour la culture de cette matière de base, les modifications qui auront pu intervenir dans l'utilisation des sols et l'intensité carbonique du biocarburant en cause. Certains objectifs définissent le niveau de performance que les pouvoirs publics attendent des fournisseurs, mais aucune pénalité ni sanction ne sera appliquée s'il n'est pas respecté. Les entreprises présenteront chaque année un rapport résumant ces informations, qui sera mis à la disposition du public. L'Administrateur publiera lui aussi un rapport annuel évaluant les performances de chaque fournisseur par rapport aux objectifs.

La société E4tech élabore actuellement des orientations techniques, qui donneront aux fournisseurs les informations et les instructions dont ils ont besoin pour être en mesure de se conformer à ces exigences. Les changements directs d'affectation des terres sont pris en compte dans les calculs sur la teneur en carbone ; quant aux changements indirects, qui n'interviennent pas dans le calcul de l'intensité carbonique « du puits à la roue », l'Administrateur en évaluera l'impact potentiel a posteriori et rendra compte au Parlement.

En juin, le gouvernement britannique a annoncé son intention d'adopter, à compter de 2010, un programme de « récompense » fondé sur les performances des carburants en matière de GES : seuls les biocarburants satisfaisant à des normes de durabilité bien précises pourront bénéficier de mesures d'incitation dès 2011. Les propositions concernant l'adoption d'une RTFO obligatoire mettant l'accent sur l'intensité carbonique, avec des normes minimales en matière de durabilité, suscitent un certain nombre de réserves. Les changements doivent être : compatibles avec les règles de l'Organisation mondiale du commerce et les exigences de l'UE en matière de normes techniques, conformes au cadre d'orientation que la Commission européenne élabore actuellement dans le contexte de la révision de la Directive sur les biocarburants, soumis à des consultations sur les impacts économiques et environnementaux et liés à la mise en place appropriée de normes de durabilité concernant les matières de base. La structure du programme devra également tenir compte des propositions formulées dans la Directive sur la qualité des carburants.

Les Pays-Bas ont prévu la mise en place en 2008 d'un système de compte rendu similaire à celui du Royaume-Uni. Des orientations techniques sont en cours d'élaboration (chez Ecofys), aussi proches que possible de celles adoptées par le Royaume-Uni.

Les autorités allemandes ont prévu d'introduire la certification en juin 2007. Bien que retardée, celle-ci devrait être obligatoire sans qu'il soit nécessaire de passer par une longue période de transition durant laquelle les comptes rendus seraient facultatifs. L'Allemagne envisage l'organisation d'ateliers en Asie et en Amérique du Sud afin de rallier à la cause de la certification les ONG et les collectivités locales, ainsi que les pouvoirs publics et les producteurs de biocarburants.

Plusieurs accords volontaires entre producteurs et ONG environnementales ont permis d'améliorer les méthodes employées pour la production d'huile de palme dans les plantations adultes. Toutefois, ces programmes ont peu de chances d'empêcher efficacement les destructions de forêt vierge au bénéfice de nouvelles plantations destinées à la production d'huile de palme. Les systèmes de certification sont conçus de manière à influencer sur la chaîne d'approvisionnement ; ils ne sont donc guère en mesure de modifier les effets directement liés à la production des matières de base des biocarburants. Bien que la politique de l'Allemagne consiste à ne pas accorder ces certificats aux carburants produits dans des régions répertoriées comme protégées, l'efficacité de sa mise en œuvre reste à déterminer.

La Californie a entrepris d'élaborer une politique visant à réduire l'intensité carbonique des carburants utilisés dans les transports, qui pourrait lier étroitement le soutien aux biocarburants utilisés dans cet Etat et les émissions de GES (Brandt et al 2007; Arons et al 2007). Cette politique exigera la réduction progressive du volume net des émissions de GES (en grammes d'équivalent CO₂ par mégajoule) dues aux carburants de transport distribués en Californie. S'il est vrai que d'autres sources d'énergie – par exemple : l'électricité – seront sur les rangs pour satisfaire à cette norme, son impact sur les biocarburants se fera fortement sentir, en partie du fait que l'essence californienne contient déjà quelque 6 % d'éthanol.

La Commission européenne a proposé un instrument similaire afin de réduire l'intensité carbonique des carburants de transport, avec un projet de Directive actuellement soumis à l'examen du Conseil européen et du Parlement européen. S'il est adopté, ce texte pourrait remplacer les objectifs volumétriques actuels concernant les biocarburants. La Commission s'emploie à définir un cadre pour la certification des carburants, qui sera indispensable à la mise en œuvre d'une réglementation sur l'intensité carbonique.

Il est important de parvenir à un consensus international sur les méthodes de calcul des GES et les normes de production durable pour que le processus de certification puisse peser sur les modes de production des carburants d'importation et ne se limite pas à la fonction de barrière douanière. En outre, les répercussions des différentes techniques agricoles étant relativement mal connues, les critères de durabilité doivent être élaborés avec des experts locaux et non pas simplement transposés à partir des pratiques en vigueur dans d'autres régions. Au vu des coûts de transaction, on peut supposer que, sans mesures complémentaires, les petits exploitants auront plus de mal à approvisionner le marché en raison des contraintes de la certification.

Il a été souligné que l'un des inconvénients possibles des systèmes de certification tenait au fait que, dès lors qu'un producteur remplit les conditions nécessaires, aucun autre incitatif ne l'encourage à améliorer ses performances. Il faut donc que les aides accordées aux carburants certifiés soient liées à une évaluation des émissions de GES pour l'ensemble du cycle de vie, avec les coûts qu'un tel suivi suppose.

Pour résumer, les aspects suivants doivent être abordés lors de l'élaboration des systèmes de certification :

- nécessité d'un accord sur les limites de l'analyse pour le cycle de vie et sur l'approche à adopter pour faire face aux changements d'utilisation des sols ;
- nécessité de recherches plus poussées sur la teneur des sols en carbone et sur les émissions de N₂O découlant des activités agricoles, afin de limiter les incertitudes scientifiques dans les analyses portant sur le cycle de vie des carburants ;
- nécessité de limiter au maximum l'utilisation de la certification comme barrière aux importations en provenance de pays à faible revenu.

Le coût des différents volets -- certification des processus de production et des pratiques agricoles, contrôles relatifs au respect des normes et recherche d'un consensus entre les parties prenantes quant à l'équité et à l'efficacité de la certification – ne sont pas anodins et doivent être maîtrisés. L'argument commercial plaide néanmoins sérieusement en faveur d'un processus de certification capable de réduire le risque de voir les subventions encourager la production de matières de base préjudiciables à l'environnement, et de promouvoir la production de biocarburants en fonction des quantités de GES effectivement non émises. Cela est particulièrement vrai pour les pouvoirs publics, tant que le marché des biocarburants continue de dépendre en quasi-totalité des subventions publiques.

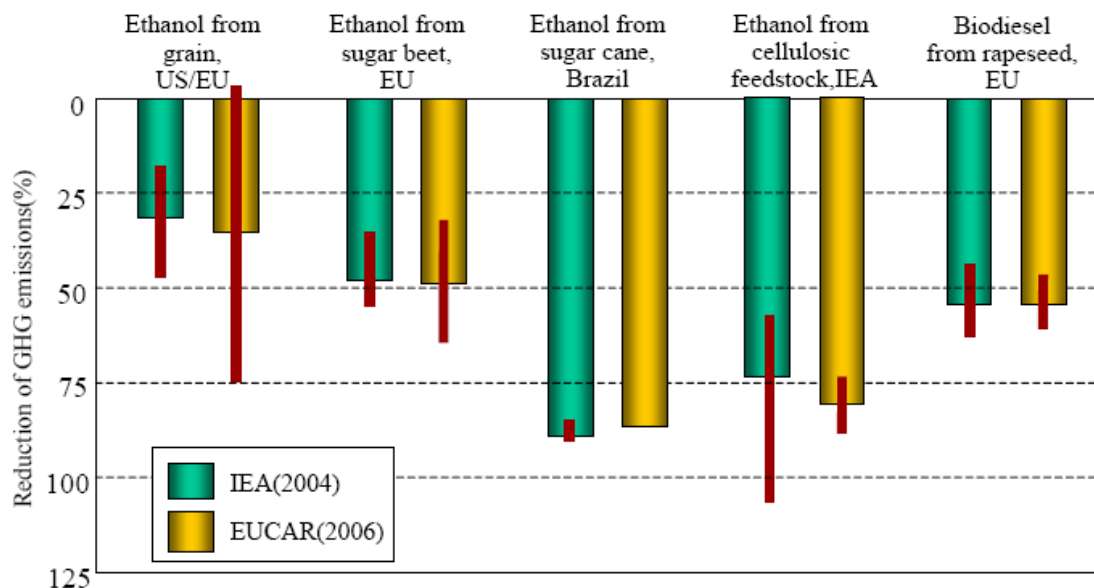
8. Production de biocarburants : perspectives

Il ressort des discussions tenues lors de la Table Ronde qu'il n'est guère réaliste de supposer que la production de biocarburants se développera au point de représenter une grande part des approvisionnements en énergie. Par exemple, la projection de l'Université du Texas, selon laquelle les carburants solides et liquides issus de la biomasse couvriraient 25 % des besoins énergétiques des Etats-Unis d'ici à 2025, exigerait de remplacer par des plantes transformables en biocarburants 50 % de la production totale d'écosystèmes du pays (écosystèmes naturels, mais aussi cultures vivrières et textiles).

Le quatrième rapport d'évaluation (2007) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) concernant les politiques visant à atténuer les changements climatiques entrevoit la possibilité que les biocarburants issus de cultures et de déchets remplacent de 5 à 10 % des carburants utilisés dans les transports routiers d'ici à 2030, le potentiel de réduction nette des émissions de GES allant de 0,6 à 1,5 milliard de tonnes d'équivalent CO₂, et le prix du carbone pouvant atteindre 25 USD/tonne d'éq. CO₂. Ces projections se fondent sur des évaluations de l'AIE, de l'EUCAR-CONCAWE-JRC (schéma 7), de General Motors-Argonne General Laboratory (GM-ANL) et de Toyota (voir références).

Au vu des incertitudes énoncées lors de la Table Ronde à propos des estimations du potentiel de réduction des émissions de GES, les prévisions du GIEC doivent être accueillies avec circonspection. Le Groupe d'experts suppose que la production de biocarburants évoluera considérablement, mais les chiffres figurant dans les études examinées par Farrell *et al.* concernant la production d'éthanol de maïs semblent indiquer que des modifications plus radicales seraient nécessaires, avec notamment l'abandon des matières de base actuelles, qui exigent beaucoup de terres, comme le maïs et le blé.

Schéma 7. Réduction des émissions de gaz à effet de serre causées par les biocarburants, du puits à la roue, par rapport aux véhicules utilisant des carburants conventionnels



Source IPCC 2007.

Légende: Ethanol de céréales, EU/UE – Ethanol de betterave sucrière, EU – Ethanol de canne à sucre, Brésil – Ethanol de matières de base cellulosiques, AIE – Biodiesel de colza, UE

A gauche : Réduction des émissions de gaz à effet de serre (%)

A supposer que l'hypothèse du GIEC (biocarburants capables de rivaliser avec le pétrole en 2030) se vérifie, le débat consacré aux aspects économiques des biocarburants lors de la Table Ronde laisse entendre que des milliards de dollars de subventions seront versés dans l'intervalle pour encourager la production de biocarburants, afin d'atteindre les objectifs fixés par l'UE et les Etats-Unis, à savoir : couvrir 10 % de la consommation de carburant du secteur des transports avant 2020. Seules de très petites quantités de biocarburants sont actuellement produites sans aide ; et même le secteur le plus performant dans le domaine des biocarburants, la production d'éthanol de canne à sucre au Brésil, a besoin chaque année d'environ 1 milliard d'USD par le biais d'exonérations de droits d'accise et de TVA.

Références

- Arons et al 2007 *A Low-Carbon Fuel Standard for California Part 2: Policy Analysis*, 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, Office of the Governor / Air Resources Board, 2007
www.energy.ca.gov/low_carbon_fuel_standard/
- Brandt et al 2007 *A Low-Carbon Fuel Standard for California Part 1: Technical Analysis*, S. R. Arons, A. R. Brandt, M. Delucchi, A. Eggert, A. E. Farrell, B. K. Haya, J. Hughes, B. Jenkins, A. D. Jones, D. M. Kammen, C. R. Knittel, D. M. Lemoine, E. W. Martin, M. Melaina, J. M. Ogden, R. Plevin, D. Sperling, B. T. Turner, R. B. Williams, et C. Yang, Office of the Governor / Air Resources Board, 2007.
www.energy.ca.gov/low_carbon_fuel_standard/ .
- Delucchi 2006 *Lifecycle Analysis of Biofuels*. Delucchi, Mark A. ITS-Davis. Mai 2006. Projet de manuscrit. Publication No. UCD-ITS-RR-06-08.
www.its.ucdavis.edu/people/faculty/delucchi
- De Oliveira *Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances and Ecological Footprint*, Marcelo E, Dias de Oliveira, Buron E. Vaughan and Edward J. Rykiel Jr., Bioscience 55(7), 2005.
- EUCAR/CONCAWE/JRC 2006 *Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, www.jrc.ec.europa.eu/wtw
- Farrell et al 2006 *Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals*, Alexander E. Farrell, Richard J. Plevin, Brian T. Turner, Andrew D. Jones, Michael O'Hare, Daniel M. Kammen, Science, Vol. 311 no. 5760, 27 janvier 2006.
- GM/ANL 2005 *Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems: A North American Study of Energy Use, Greenhouse gas emissions and Criteria Pollutant Emissions*
www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/339.pdf.
- Graboski *Fossil Energy Use in the Manufacture of Corn Ethanol*, Michael S. Graboski, Colorado School of Mines, prepared for the National Corn Growers Association, 2002.
- AIE 2004 *Biocarburants pour le transport : une perspective internationale*, Agence internationale de l'énergie, Paris.
- GIEC 2007 *Bilan 2001 des changements climatiques : mesures d'atténuation*. Contribution du Groupe de travail III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, Etats-Unis.
- Jones 2007 *Biofuel Boundaries: Estimating the Medium-Term Supply Potential of Domestic Biofuels*, Andrew D. Jones, University of California Berkeley. Transportation Sustainability Research Center Working paper UCB-ITS-TRSRC-RR-2007-4, août 2007.
- Koplow 2007 *Biofuels - At What Cost? Government support for ethanol and biodiesel in the United States 2007 Update*, Doug Koplow (Earth Track), Global Subsidies Initiative, Institut international du développement durable, Genève, à paraître.

- Kutas *et al.* 2007 *Biofuels - At what cost? Government support for ethanol and biodiesel in the European Union*, Geraldine Kutas, Carina Lindberg et Ronald Steenblik, Global Subsidies Initiative, Institut international du développement durable, Genève, à paraître.
- Patzek *Thermodynamics of the Corn-Ethanol Biofuel Cycle*, T.W. Patzek, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(6), 2004.
- Patzek 2007 *A First-Law Thermodynamic Analysis of the Corn-Ethanol Cycle*, Tad W. Patzek, *Natural Resources Research*, Vol. 15, No. 4, 255-270, 2007
- Patzek 2007a *Earth, Humans and Energy*, Tad W. Patzek, 2007, University of California Berkeley, à paraître.
- Pimentel *Ethanol Production Using Corn, Switchgrass and Wood; Biodiesel production Using Soybean and Sunflower*, David Pimentel et Tad W. Patzek, *Natural Resource Research*, 14(1), 2005.
- Shapouri *The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update*, Hosein Shapouri, James A. Duffield and Michael Wang, Ministère de l'Agriculture des Etats-Unis, *Agricultural Economic Report No. 814*, 2002.
- Toyota 2004 *Well-to-Wheel Analysis of Greenhouse gas emissions of Automotive Fuels in the Japanese Context*, Mizuho, Tokyo.
- Tyner 2007 *US Ethanol Policy*, W. Tyner, Purdue University, 2007.
- Wang *The Greenhouse gases, regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model, version 1.6*, Michael Wang, Transportation Technology R&D Centre, Argonne National Laboratory.
- Zah *et al.* 2007 *Ecobilan d'agents énergétiques : évaluation écologique de biocarburants*, Rainer Zah, Heinz Böni, Marcel Gauch, Roland Hischier, Martin Lehmann et Patrick Wäger, Empa, Division Technologie et société, St-Gall, Suisse.

- - - - -