



**HAL**  
open science

# Environnement, usage des sols et carbone renouvelable : illustration à partir du cas des biocarburants et perspectives pour la biomasse

Stephane S. de Cara

► **To cite this version:**

Stephane S. de Cara. Environnement, usage des sols et carbone renouvelable : illustration à partir du cas des biocarburants et perspectives pour la biomasse. *Innovations Agronomiques*, 2013, 26, pp.101-116. hal-01000697

**HAL Id: hal-01000697**

**<https://hal.science/hal-01000697>**

Submitted on 28 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

## **Environnement, usage des sols et carbone renouvelable : Illustration à partir du cas des biocarburants et perspectives pour la biomasse**

**De Cara Stéphane <sup>1</sup>**

<sup>1</sup> INRA, UMR Economie Publique INRA-AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon

**Correspondance** : stde cara@grignon.inra.fr

### **Résumé**

La mobilisation croissante de carbone renouvelable de la biomasse a suscité des interrogations sur ses effets environnementaux nets, en particulier lorsque sont pris en compte les changements d'affectation des sols (CAS). Ce texte présente tout d'abord les mécanismes économiques à l'origine des CAS. Il les illustre ensuite à partir des résultats d'une revue quantitative récente de la littérature évaluant les effets du développement des biocarburants sur les CAS et les émissions de gaz à effet de serre. Ces éléments montrent que le bénéfice en termes d'effet de serre que l'on peut attendre des biocarburants est susceptible d'être considérablement amoindri si sont pris en compte les effets des CAS directs et indirects. Les différentes approches utilisées (analyses de cycle de vie conséquentielles, modèles économiques) dans la littérature sont ensuite comparées. A partir de ces éléments sur le cas des biocarburants, quelques enseignements des enjeux liés aux usages des sols pour le développement des usages de la biomasse et des bio-ressources au sens large sont tirés.

**Mots-clés** : Changement d'allocation des sols, émissions de gaz à effet de serre, modèles économiques d'équilibre, ACV conséquentielle.

### **Abstract : Environment, land use, and renewable carbone : illustration from the case of biofuels and perspectives for the development of biomass**

The increasing use of renewable carbon has prompted a fierce debate about its net environmental effects, in particular when factoring in implications for land use and land-use change (LUC). In this text, we present the mechanisms at play and illustrate them by using the results of a recent quantitative review of the literature that addresses the issue of the impacts of biofuel development on LUC and greenhouse gas (GHG) emissions. These results show that, as soon as direct and indirect LUC are taken into account, the environmental benefit of biofuels in terms of GHG emissions is likely to be considerably less than what standard life-cycle analysis (LCA) suggest. The approaches used in the literature (consequential LCA, economic models) are then compared and discussed. Based on these elements, we draw some perspectives for the development of biomass and bio-resources (beyond biofuels) with respect to land use.

**Keywords**: Land-use change, greenhouse gas emissions, equilibrium models, consequential LCA.

## Introduction

Au cours des dix dernières années, la mobilisation des ressources qu'offre la biomasse a suscité un intérêt important, ouvrant des perspectives techniques et économiques nouvelles et donnant lieu à des politiques publiques ambitieuses pour promouvoir et développer la production et/ou l'utilisation de carbone renouvelable (Union Européenne, 2003).

Ce mouvement a été porté à la fois par les contraintes pesant sur la disponibilité des ressources fossiles et par la perspective de débouchés supplémentaires pour les produits agricoles et/ou forestiers. Dans le cas des usages énergétiques de la biomasse, il a été renforcé par la volonté de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES). Grâce à un recyclage relativement rapide du carbone de l'atmosphère par la photosynthèse, le recours à du carbone renouvelable permet ainsi de s'affranchir (au moins en partie) de la contrainte de disponibilité pesant sur les ressources fossiles, tout en limitant l'accumulation de GES dans l'atmosphère. Le cas du développement des biocarburants illustre bien ce mouvement. Si les trois facteurs rappelés ci-dessus ont été mis en avant, c'est l'atténuation des émissions de GES qui a dominé dans la justification récente des politiques publiques mises en œuvre pour développer les biocarburants (Union Européenne, 2009a et 2009b).

La mise en évidence de l'importance des changements d'affectation des sols (CAS) induits par le développement des biocarburants a conduit scientifiques et décideurs publics à réinterroger l'évaluation des effets environnementaux globaux de ces politiques, notamment en termes d'impact sur l'effet de serre (Searchinger et al, 2008, Commission Européenne, 2012).

Dans leurs grandes lignes, les mécanismes mis en jeu par les CAS sont relativement simples. La nouvelle demande pour les produits agricoles que constituent les biocarburants contribue à accroître la concurrence entre usages alimentaires (au sens large) et énergétiques, ce qui se traduit par une tension sur les marchés, une augmentation des prix agricoles et donc une incitation à produire. Dès lors que cet accroissement de l'offre est obtenu (au moins partiellement) par des CAS et que ces derniers sont émetteurs de CO<sub>2</sub>, l'effet positif sur les émissions de GES peut être amoindri, voire remis en cause. Se pose alors la question d'un soutien public au développement de ces filières justifié par leur participation efficace à la lutte contre l'effet de serre (Cour des Comptes, 2012).

La question des CAS illustre l'importance de prendre en compte, dans les évaluations environnementales des effets d'une mobilisation croissante du carbone renouvelable, des contraintes pesant sur les facteurs de production de la biomasse, au premier rang desquels la terre. Les effets induits sur les prix et les marchés agricoles, qui sont au cœur du mécanisme en jeu, reflètent la rareté relative de ce facteur vis-à-vis d'une demande accrue pour des usages concurrents.

Ces quelques éléments soulèvent deux questions. La première est empirique : Les conséquences des CAS sont-elles de nature à remettre en cause les bénéfices en termes d'émissions de GES que l'on peut attendre de la substitution de carbone fossile par du carbone en « cycle court » ? La seconde est d'ordre plus méthodologique : Comment prendre en compte les effets dus aux CAS dans l'évaluation environnementale des politiques publiques visant à promouvoir la production et/ou l'utilisation de carbone renouvelable ?

La première question en appelle elle-même trois autres: celle du *signe* de l'effet net des CAS sur le bilan total en termes de GES, celle de son *ampleur*, et celle de l'*incertitude* qui entoure les évaluations qui peuvent en être faites. Afin d'apporter des éléments de réponse à ces trois questions, ce texte s'appuie sur les résultats d'une revue quantitative de la littérature sur les effets des CAS dus au développement des biocarburants menée récemment par l'INRA pour l'ADEME (De Cara *et al.*, 2012).

La seconde question amène à s'interroger sur les outils disponibles pour l'évaluation environnementale, et notamment sur l'analyse de cycle de vie (ACV). L'ACV constitue l'outil privilégié dans l'évaluation des effets environnementaux des biocarburants (Cherubini *et al.*, 2009). Cet outil permet d'intégrer de manière à la fois détaillée, transparente et normalisée, les conséquences environnementales des

différentes étapes du cycle de vie d'un produit, de la transformation des matières premières nécessaires à sa production à sa consommation par l'utilisateur final. Raisonnant sur un système technique donné (souvent sur une filière) dont les frontières sont considérées fixes, il est néanmoins mis en défaut dès que la production du bien étudié a des impacts environnementaux au-delà du système considéré, voire affecte les frontières même du système et/ou les paramètres techniques qui le définissent. Les mécanismes en jeu dans les CAS sont une illustration de ce type de phénomènes.

Ce constat a amené à élargir le cadre de l'évaluation au-delà des seules ACV attributives dans deux directions :

- (i) le développement d'ACV dites *conséquentielles* (Schmidt, 2008, Kløverpris *et al.*, 2008) qui visent à décrire explicitement la chaîne causale des conséquences du développement du recours à la biomasse et leurs conséquences en termes de GES, en raisonnant sur les quantités et en s'appuyant sur le cadre normalisé de l'ACV attributive,
- (ii) l'intégration dans les modèles économiques d'équilibre (partiel ou général) d'une représentation explicite des usages des sols et des conséquences de leurs changements sur les émissions de GES (Hertel *et al.*, 2009). Ces deux approches ont produit parallèlement un nombre important d'évaluations des conséquences en termes de GES des CAS dus au développement des biocarburants dans différents contextes.

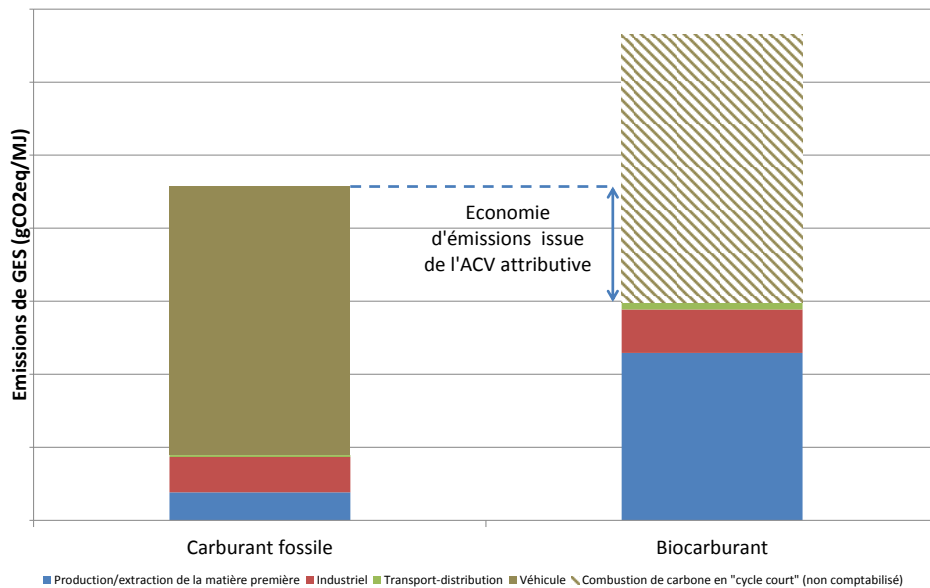
Ce texte propose une comparaison de ces deux approches pour la prise en compte des usages sols et identifie des perspectives de dialogue possible entre elles. En s'appuyant sur cette comparaison et les résultats obtenus dans le cas des biocarburants, le champ de la discussion est ensuite élargi aux implications de la prise en compte des usages des sols dans la perspective d'un développement de la biomasse en général.

## **1. Développement des biocarburants, changements d'allocation des sols et émissions de GES : éléments de contexte et définitions**

### *1.1 Emissions de GES dues aux biocarburants : résultats des ACV attributives*

Les bilans en émissions de GES des biocarburants disponibles dans la littérature reposent dans leur grande majorité sur des ACV attributives (Cherubini *et al.*, 2009). Ces dernières comptabilisent les émissions de GES à chacune des étapes du cycle de vie du carburant considéré (production de la matière première, transport, transformation, distribution, combustion) en tenant compte pour chaque étape des intrants utilisés dans le processus, des coproduits éventuels et des émissions (ou crédits d'émissions) associées. Ces analyses sont menées séparément pour chaque filière (éthanol de maïs, blé, canne, betterave ; biodiesel de colza, de palme, de soja, etc...) sous différentes hypothèses techniques (par exemple incorporation directe ou sous forme d'ETBE dans le cas de l'éthanol ; esters ou huile végétale pure pour les filières huile). Les émissions de GES ainsi calculées sont ramenées à une unité fonctionnelle commune (par exemple, le MJ).

Ces émissions (exprimées en gCO<sub>2</sub>eq/MJ) peuvent ensuite être comparées à celles obtenues par une démarche similaire pour chacune des étapes associées à la production et la consommation du carburant fossile de référence (extraction, transport, raffinage, distribution, combustion de l'essence ou du diesel). Il est à noter que les émissions de CO<sub>2</sub> associées à la combustion des biocarburants ne sont pas comptabilisées dans l'ACV des biocarburants, alors qu'elles comptent pour une part importante dans l'ACV du carburant fossile. En effet, au contraire de celui émis lors de la combustion de fossile, le carbone contenu dans le CO<sub>2</sub> émis peut être considéré comme du carbone en « cycle court » (issu de la fixation récente de CO<sub>2</sub> atmosphérique par la photosynthèse) qui ne participe donc pas à l'accumulation de GES dans l'atmosphère. La figure 1 illustre schématiquement les termes de cette comparaison.



**Figure 1** : Comparaison illustrative des émissions de GES associées au carburant fossile et aux biocarburants issues des ACV attributives (sans tenir compte des changements d'affectation des sols).

Une étude menée pour l'Ademe a proposé ainsi une évaluation des émissions de GES des biocarburants de première génération dans le contexte français (Ademe, 2010). Il en ressort quelques éléments essentiels :

- L'ensemble des filières examinées permettent une réduction des émissions de GES de 24 à plus de 90% selon les filières et les hypothèses techniques retenues.
- Si les émissions de GES associées au carburant fossile sont très majoritairement dues à la phase de combustion, celles associées aux biocarburants sont largement déterminées par les émissions durant la phase agricole (production de la matière première). C'est notamment vrai pour les filières d'huiles végétales où ces émissions représentent entre 50 (palme) et 75% (blé) de l'ensemble des émissions du cycle de vie.
- Les filières issues des huiles végétales présentent un bilan ACV en termes de GES plus favorable (de 8 à 37 gCO<sub>2</sub>eq/MJ selon les matières premières) que celui des filières éthanols (de 25 à 69 gCO<sub>2</sub>eq/MJ).

Ces évaluations n'intègrent pas l'effet des CAS sur les émissions. Divers scénarios pour chacune des filières étudiées ont été testés pour tenter d'intégrer ce point (ADEME, 2010, p. 206). Si cette analyse de sensibilité n'a pas permis de conclure de manière définitive sur la question, elle a montré néanmoins que les résultats présentés ci-dessus sont susceptibles d'être profondément modifiés dès que l'on tient compte des émissions dues aux CAS.

## 1.2 Changements d'allocations des sols directs et indirects

Le recours accru à des biocarburants s'apparente à une demande additionnelle adressée à l'agriculture. Celle-ci entraîne un ajustement à la hausse des prix sur les marchés qui incitent les producteurs à produire plus. Trois voies sont possibles pour répondre à ces incitations et satisfaire cette demande additionnelle :

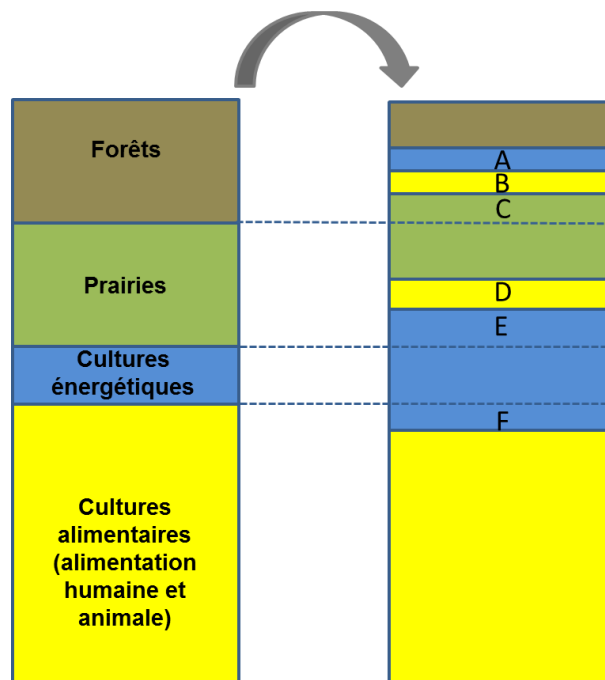
- Intensification : La production des matières premières agricoles peut être intensifiée par exemple grâce à un recours accru aux intrants azotés.
- Substitution : Le prix de certains produits s'établissant à un niveau plus élevé, la demande pour ces produits peut diminuer et/ou se reporter sur d'autres produits. Ces substitutions peuvent

aussi concerner l'offre, par exemple en modifiant la destination de certains produits agricoles (de l'alimentation humaine vers des usages énergétiques) ou l'allocation des cultures au sein des terres agricoles déjà utilisées. Enfin, les coproduits issus de la production de biocarburants peuvent également se substituer à des produits utilisés dans l'alimentation animale.

- Expansion : De nouvelles terres peuvent être mises en cultures pour satisfaire la demande supplémentaire.

Ces trois voies ne sont ni mutuellement exclusives, ni indépendantes. Il est vraisemblable que le nouvel équilibre atteint combine à des degrés divers ces trois composantes. La combinaison d'intensification, de substitution et d'expansion en réponse au choc de demande peut de plus varier à la fois selon les produits et les pays en fonction du degré d'intégration des marchés et des caractéristiques des systèmes d'offre et de demande, notamment de l'intensité de la réponse des agents à des variations de prix (Keeney, Hertel, 2009 ; Dumortier *et al.* 2011 ; Villoria, Hertel, 2011 ; Laborde et Valin, 2012).

Les CAS peuvent résulter de phénomènes d'expansion et/ou de substitution lorsque ceux-ci concernent l'allocation des surfaces entre les usages. Les phénomènes d'intensification tendent au contraire à limiter les CAS, même s'ils ne sont pas forcément sans conséquences sur les émissions de GES liées à la production agricole. Il convient à ce niveau de distinguer CAS directs et CAS indirects. La Figure 2 illustre, de manière schématique et sur un exemple théorique, les modifications dans l'allocation des sols résultant de la mise en place (toutes choses égales par ailleurs) d'une politique visant à promouvoir le développement des biocarburants.



**Figure 2** : Représentation schématique des changements d'affectation des sols directs et indirects. La partie gauche (et respectivement droite) de la figure représente l'allocation des sols sans (et respectivement avec) la mise en place d'une politique visant à développer les biocarburants. Les CASd sont représentés par les surfaces A, E et F et les CASi par les surfaces B, C et D. Les proportions et les ordres de grandeur conversions sont donnés à titre purement illustratif.

Les *changements d'affectation des sols directs* (CASd) se traduisent par des changements d'usage vers des cultures impliquées dans la production de biocarburants. Dans l'exemple illustré dans la Figure 1, ils sont représentés par les surfaces A, E et F. Ils peuvent correspondre soit à de l'expansion sur des surfaces précédemment non-agricoles (A), à des conversions de prairies (E) ou, plus

simplement, à une diversion des matières premières initialement destinées à l'alimentation humaine ou animale vers des usages énergétiques (F).

Les *changements d'affectation des sols indirects* (CASi) correspondent à des changements d'affectation qui conduisent à un usage final qui n'est pas énergétique et *qui n'auraient pas eu lieu sans le développement des biocarburants*. Ils sont représentés sur l'exemple de la Figure 2 par les surfaces B, C et D. Ils peuvent impliquer des conversions des terres initialement en forêt (B) ou en prairies (D) vers des cultures ou des déplacements plus complexes (par exemple, de forêt vers prairies, C).

Si tant est que l'on dispose des systèmes de mesure, de suivi et de contrôle adéquats, les CASd peuvent être relativement aisément quantifiables. Les CASi sont, par nature, plus difficiles à cerner. En effet, l'allocation des sols ne dépend pas uniquement des politiques visant à promouvoir le développement des biocarburants, mais de l'ensemble des paramètres qui influent sur les marchés et les prix. Il ne s'agit donc pas d'attribuer l'ensemble des CAS aux seuls biocarburants, mais de déterminer la part de ces CAS qui peut être imputable aux modifications qu'implique leur développement *toutes choses égales par ailleurs*. En outre, l'exemple présenté dans la Figure 2 est fondé sur une allocation des sols au niveau global et pour une catégorisation assez grossière des usages des sols. Les changements nets qui y sont figurés peuvent masquer des évolutions plus contrastées à une résolution plus fine (à la fois spatialement et en termes de définitions des usages).

### 1.3 CAS et émissions de GES

Les émissions de GES associées aux CAS correspondent essentiellement à des émissions de CO<sub>2</sub> dues à des conversions entre des usages caractérisés par des stocks de carbone différents (à la fois dans les sols et, lorsque c'est pertinent, dans la biomasse aérienne). Les variations de stock correspondantes peuvent conduire soit à des sources soit à des puits de GES.

L'hétérogénéité des stocks de carbone à la fois dans l'espace et en fonction des usages est un élément essentiel dans le calcul des émissions liées au CAS. Les conséquences sur les émissions de GES sont très dépendantes des usages initial et final, du type de sol, du climat et des modes de gestion (par exemple forestière). La simple diversion d'une culture auparavant destinée à l'alimentation humaine vers des usages énergétiques a des conséquences nulles (à pratiques inchangées) sur les stocks de carbone des sols (F sur la Figure 2). Elle peut même contribuer à des économies d'émissions, si les coproduits sont valorisés (par exemple comme aliments pour le bétail) et qu'ils permettent ainsi de libérer des terres initialement dédiée à l'alimentation animale. A l'inverse, les conversions de forêts en cultures (par exemple A et B) peuvent impliquer des transferts importants du carbone des sols et de la biomasse aérienne vers l'atmosphère. A titre d'illustration, Laborde et Valin (2012) retiennent ainsi des stocks de carbone qui peuvent varier d'un facteur 20 selon les usages, les régions et les modes de gestion.

La variation du stock de carbone a lieu essentiellement au moment du changement d'affectation. A l'inverse, les économies permises par le recours à du carbone en cycle court en substitution à du carbone fossile s'inscrivent dans la durée (aussi longtemps que les biocarburants sont utilisés). Il convient donc de rendre compatibles ces deux éléments du bilan en GES. Une solution consiste à annualiser la variation de stocks initiale. A cet égard, la convention retenue peut différer d'une étude à l'autre. Elle est généralement de 20 ans (Al-Riffai *et al.*, 2010 ; Laborde, 2011 ; Reinhard et Zah, 2011, par exemple) ou de 30 ans (Searchinger *et al.*, 2008 ; Dumortier *et al.*, 2009 ; Hertel *et al.*, 2010 par exemple). Ce choix est déterminant dans la comparaison des émissions de GES des biocarburants et du carburant fossile. La convention retenue par la Commission Européenne (2010) correspond à un amortissement linéaire sur 20 ans compatible avec les préconisations du Giec (Peynman *et al.*, 2003).

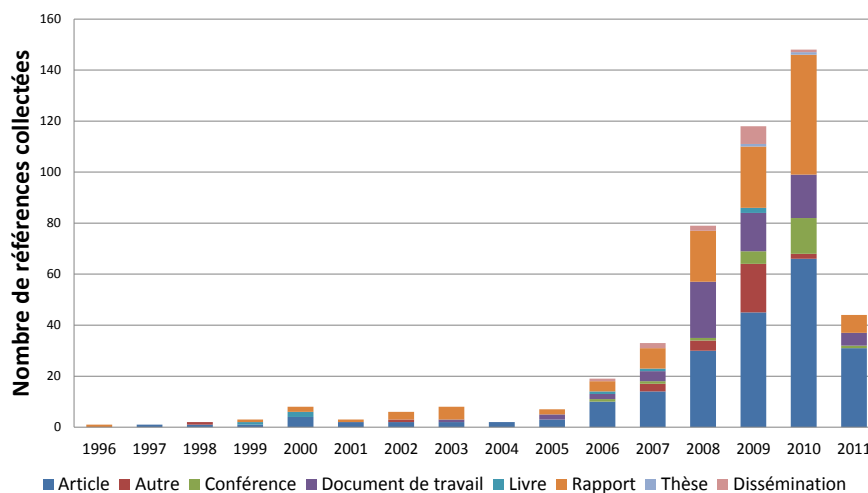
Annualisées et ramenées à la quantité d'énergie contenue dans les biocarburants, les émissions dues au CAS peuvent être rapprochées des résultats des ACV attributives et compléter la comparaison partielle présentée à la Figure 1. On obtient ainsi un *facteur CAS* (exprimé en gCO<sub>2</sub>eq/MJ) qui regroupe

l'ensemble des émissions imputables aux changements d'affectation des terres qu'ils soient directs ou indirects. Il n'est pas exclu que ce facteur soit négatif, les puits associés aux CAS l'emportant alors sur les sources de GES. Selon les approches, l'effet total peut être ou non décomposable en deux facteurs distincts correspondant aux CASd et CASi.

Afin de contourner la difficulté du choix arbitraire de la période d'amortissement, dont les effets mécaniques sur la valeur du facteur CAS peuvent être importants, une approche alternative consiste à calculer le *temps de retour* (exprimé en années). Cet indicateur représente la durée sur laquelle il est nécessaire de maintenir les économies de GES permises par l'utilisation de biocarburants (telles que calculées par l'ACV attributive) pour compenser la « dette carbone » initiale (Searchinger *et al.*, 2008). Si cet indicateur permet de mieux rendre compte de la nature essentiellement dynamique du problème, il est moins directement comparable avec les résultats des ACV et se prête plus difficilement à l'agrégation.

## 2. Les émissions liées aux CAS dans la littérature

Dans la période récente, un grand nombre d'études se sont intéressées à la question des CAS dus au développement des biocarburants et à leurs conséquences sur les émissions nettes de GES. Une revue de la littérature récente a ainsi recensé 485 références abordant cette question sur une période allant jusqu'à 2011 (De Cara *et al.*, 2012), (voir Figure 3).



**Figure 3** : Nombre d'études collectées dans De Cara *et al.* (2012) par type de référence et par année de publication.

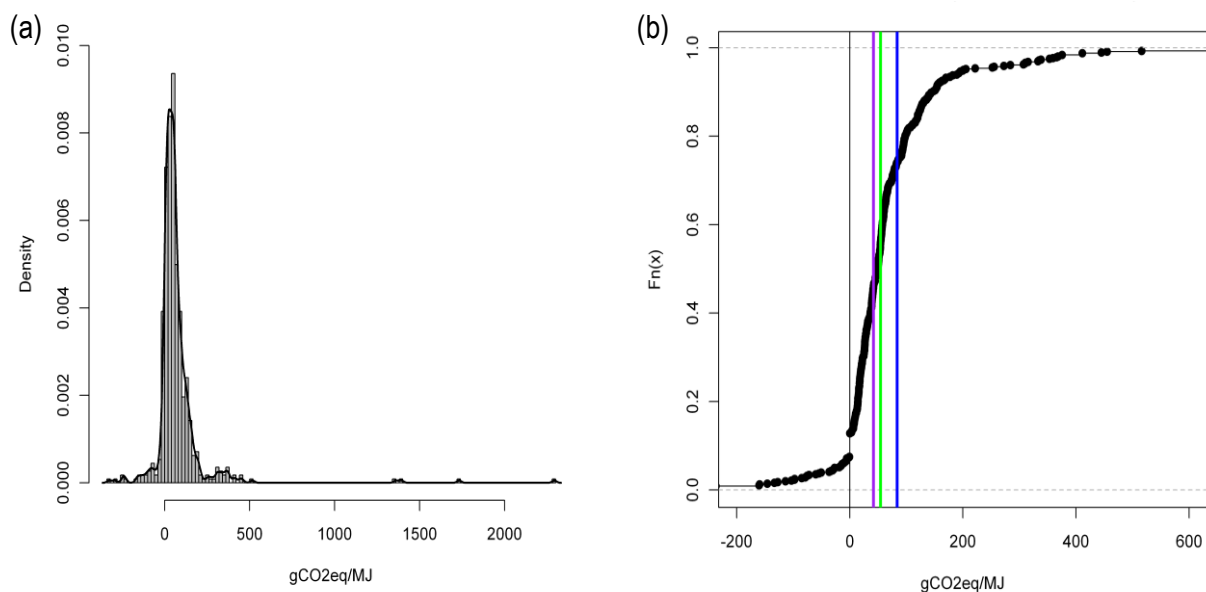
Parmi ces études, 464 ont pu être analysées et 71 références fournissent une évaluation quantitative des effets des CAS sur les émissions de GES, non-redondante et suffisamment transparente pour être exploitable quantitativement. Chaque référence pouvant fournir plusieurs évaluations correspondant à autant de scénarios et/ou jeux d'hypothèses, 561 évaluations des émissions de GES liées aux CAS (direct et indirect) ont ainsi été collectées. Ces évaluations ont été harmonisées (en particulier pour tenir compte de la durée d'amortissement) et exprimées sous la forme d'un facteur CAS annualisé sur 20 ans (en gCO<sub>2</sub>eq/MJ).

La distribution des évaluations collectées et harmonisées est représentée sur la Figure 4.a. Ces évaluations s'étalent sur une plage très large relativement aux émissions associées au carburant fossile de référence (84 gCO<sub>2</sub>eq/MJ retenu dans Union Européenne, 2009a, 91 gCO<sub>2</sub>eq/MJ dans ADEME, 2010). L'intervalle des évaluations du facteur CAS va de -327 gCO<sub>2</sub>eq/MJ à 2293 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. La dispersion des évaluations est également très grande (coefficient de variation supérieur à 2). La médiane (48 gCO<sub>2</sub>eq/MJ) est d'environ 33% inférieure à la moyenne (71 gCO<sub>2</sub>eq/MJ).



Dans l'ensemble, les évaluations collectées aboutissent à des valeurs élevées du facteur CAS. Si l'on retient la médiane comme indicateur synthétique, l'effet seul des CAS (i.e. sans tenir compte des émissions comptabilisées dans les ACV attributives) réduirait considérablement l'économie d'émissions que l'on peut attendre des biocarburants, voire serait susceptible d'en inverser le signe pour certaines filières. La Figure 4.b indique également qu'environ un quart des évaluations du facteur CAS sont supérieures aux émissions imputables au carburant fossile. Si on y ajoute les émissions liées à la production, la transformation et la distribution des biocarburants, les émissions totales associées aux biocarburants sont supérieures à celles du carburant fossile de référence dans plus de la moitié des évaluations.

Pour autant, ces quelques éléments de statistiques descriptives ne sont pas suffisants pour répondre de manière définitive aux trois questions soulevées dans l'introduction (signe de l'effet CAS sur les émissions, son ampleur et l'incertitude qui l'entoure). Ils mettent en effet sur un pied d'égalité des résultats obtenus avec des approches, des hypothèses, des scénarios, des statuts très différents.



**Figure 4** : Distribution des évaluations du facteur CAS collectées (n=561) dans De Cara et al. (2012).

Le facteur CAS (en gCO<sub>2</sub>eq/MJ, annualisé sur 20 ans) inclut les émissions liées à la fois aux CAS directs et indirects, mais n'inclut pas les émissions liées à la production de la matière première, à sa transformation ni à sa distribution. Les émissions du carburant fossile de référence sont figurées en bleu (83,8 gCO<sub>2</sub>eq/MJ, valeur par défaut tirée de la directive 2009/28/CE (Union Européenne, 2009a). Les seuils de 35% et de 50% de réduction par rapport à cette valeur sont figurés en vert et en violet, respectivement. Afin de faciliter la lecture, l'intervalle des abscisses sur la représentation de la cumulative (b) a été limité entre -200 et 600 gCO<sub>2</sub>eq/MJ.

Afin de faciliter la comparaison des résultats entre les études, De Cara *et al.* (2012) ont conduit une méta-analyse, mettant en relation les évaluations obtenues avec des variables quantitatives reflétant le statut de l'étude, les hypothèses prises (concernant l'échelle spatiale, les filières et les types de CAS considérés, la représentation des comportements d'offre et de demande), ainsi que le type d'approche et le modèle utilisés. Les analyses statistiques menées (méta-régressions) permettent d'isoler et de quantifier statistiquement l'influence de ces caractéristiques et hypothèses sur l'évaluation du facteur CAS. Il en ressort notamment que :

- *Le type d'approche compte.* Les méta-régressions menées séparément sur les résultats des études économiques et des ACV conséquentielles font apparaître des différences importantes dans l'ampleur et la significativité de l'influence des variables considérées. A jeu d'hypothèses donné, les approches conséquentielles conduisent à des évaluations du facteur CAS en moyennes plus faibles que les modèles économiques.

- *Le type de filière compte.* Toutes choses égales par ailleurs, le facteur CAS est d'autant plus grand (resp. faible) que la part de biodiesel (resp. bioéthanol) est forte (resp. faible). L'écart estimé entre ces deux filières est ainsi, toutes choses égales par ailleurs, de 22 à 27 gCO<sub>2</sub>eq/MJ selon les approches.
- *Les ajustements de marché comptent.* Les évaluations qui tiennent compte des possibilités d'intensification (réponse endogène des rendements aux variations des prix) aboutissent, toutes choses égales par ailleurs, à des évaluations du facteur CAS plus faibles (de 11 à 78 gCO<sub>2</sub>eq/MJ selon les approches). Les évaluations qui intègrent les variations endogènes de la demande en fonction des prix aboutissent également à des évaluations plus faibles du facteur CAS (de 12 à 43 gCO<sub>2</sub>eq/MJ selon les approches).
- *Les types de CAS considérés comptent.* Les études qui tiennent compte de la possibilité de conversion des tourbières (très riche en carbone) aboutissent, toutes choses égales par ailleurs, à des évaluations du facteur CAS significativement plus élevées (de 16 à 45 gCO<sub>2</sub>eq/MJ selon les approches) que celles qui ne le font pas.

En outre, les résultats de cette méta-analyse permettent d'apporter les éléments de réponse suivants aux trois questions initiales concernant l'effet des CAS sur les émissions de GES :

- *Signe :* Les résultats suggèrent que la prise en compte des CAS est susceptible d'alourdir le bilan net en émissions de GES des biocarburants. Ainsi, près de 90% des évaluations collectées du facteur CAS sont positives. Les évaluations qui concluent à un facteur CAS négatif sont presque exclusivement issues d'ACV conséquentielles et nécessitent des combinaisons d'hypothèses particulières concernant les filières, les conversions d'usages considérées et la représentation des mécanismes de marché sous-jacents.
- *Ampleur :* Pour un même jeu d'hypothèses correspondant au contexte européen et tiré de Laborde (2011), les prédictions du facteur CAS tirées de la méta-régression vont de 42 à 107 gCO<sub>2</sub>eq/MJ selon le modèle économique considéré (de 11 à 99 gCO<sub>2</sub>eq/MJ pour les études conséquentielles). L'évaluation centrale (tous modèles confondus) est de 72 gCO<sub>2</sub>eq/MJ (60 gCO<sub>2</sub>eq/MJ pour les études conséquentielles).
- *Incertitude :* Interpréter trop rapidement la grande variabilité des évaluations observée à la Figure 4 comme le seul reflet de l'incertitude serait une erreur. En contrôlant pour l'adoption d'un nombre restreint de variables, les méta-modèles estimés permettent en effet d'expliquer de 40 à 65% de la variance initiale des évaluations. Ceci illustre l'influence des différences dans les hypothèses et les caractéristiques des études considérées sur les résultats. Ramenées à une base commune, la plage des variations des évaluations entre modèles et/ou études, bien que non négligeable, est beaucoup plus restreinte.

S'ils ne permettent pas d'affirmer que le bilan net total des biocarburants en termes de GES est dans tous les cas négatif, les ordres de grandeur mis en évidence ci-dessus remettent néanmoins très largement en cause la possibilité qu'ils participent de manière significative et efficace à la lutte contre l'effet de serre. Par ailleurs, si une incertitude demeure, elle ne peut justifier à elle seule d'ignorer l'effet des CAS. A cet égard, ces résultats confirment les conclusions de Plevin *et al.* (2010) et de Laborde et Valin (2012) obtenus avec des approches différentes.

### 3. ACV conséquentielles et modèles économiques

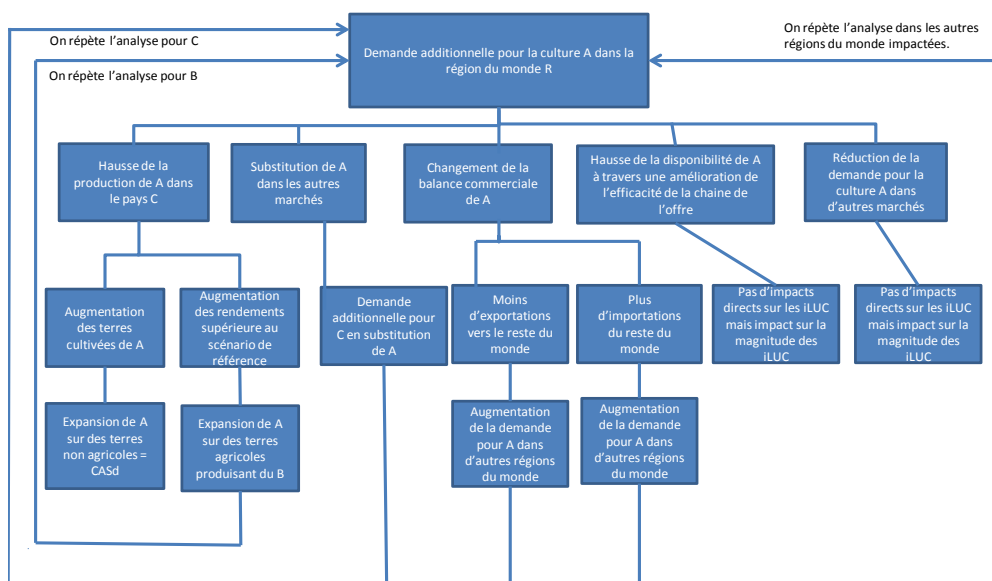
Comme on l'a vu plus haut, ACV conséquentielles et modèles économiques n'aboutissent pas nécessairement à des évaluations convergentes des effets des CAS sur les émissions de GES. Les ACV conséquentielles concluent plus souvent à des facteurs CAS négatifs que ne le font les modèles économiques et, en moyenne et pour le même jeu d'hypothèses, elles conduisent à des évaluations plus optimistes. Ces divergences peuvent-elles être expliquées par des raisons méthodologiques ?

Cette section a pour objet de comparer les traits méthodologiques marquants de ces deux approches afin d'apporter des éléments de réponse à cette question.

Les ACV conséquentielles se sont développées sur un formalisme proche de celui des ACV attributives. Elles bénéficient ainsi d'un cadre normalisé et relativement transparent. En outre, elles peuvent s'appuyer sur des bases de données de références techniques très détaillées. Le cadre normalisé qu'offrent les ACV conséquentielles est un atout majeur en ce qu'il permet de relier facilement leurs résultats à ceux des ACV attributives qui jouent un rôle structurant dans le débat public. La cohérence entre ACV attributives et résultats des modèles économiques est moins évidente à garantir, les logiques prévalant dans ces deux approches étant plus éloignées.

Le cadre général de l'ACV représente les processus techniques par des coefficients techniques et environnementaux fixes. Transposée en termes économiques, cette démarche peut être assimilée à une approche de type Leontief (1966) fondée sur des matrices entrées-sorties qui décrivent les combinaisons des intrants nécessaires à la production du (ou des) biens considérés. Pour un processus donné, les intrants sont supposés être utilisés en proportions fixes. Ce type d'approche se prête difficilement à la prise en compte des phénomènes d'intensification, de substitution et d'expansion, qui, on l'a vu, sont au cœur des mécanismes à l'œuvre dans les CAS.

Pour contourner cette difficulté, les ACV conséquentielles élargissent le cadre standard des ACV attributives en intégrant à l'analyse une description explicite de la chaîne causale à la source des effets directs et indirects des modifications analysées (comme par exemple le développement des biocarburants). Les phénomènes d'intensification, de substitution et/ou d'expansion sont intégrés à chaque étape de cette chaîne causale au moyen d'hypothèses portant sur les quantités produites et substituées et les surfaces converties correspondantes. La justification de ces hypothèses ne fait pas l'objet d'une normalisation aussi forte que celle qui prévaut pour les autres composantes de l'ACV. Cette démarche implique également d'élargir à chaque étape le champ de l'analyse au-delà de la filière considérée initialement (en termes de cultures et/ou de produits concernés) et au-delà de la région initiale de production. En outre, chacune des hypothèses faites à chaque étape peut rétroagir sur les hypothèses prises aux étapes précédentes, ce qui impose une démarche itérative qui peut rapidement devenir très complexe. La Figure 5 (adaptée de Bauen *et al.*, 2010) illustre, sur un exemple simplifié, cette complexité.



**Figure 5 :** Description des relations causales dans les mécanismes conduisant au cas (adaptée de Bauen *et al.*, 2010).

Aux yeux d'un économiste, la Figure 5 s'apparente à un processus familier de tâtonnement de retour à l'équilibre après une perturbation du système. Les modèles d'équilibre (partiel ou général) se sont développés pour résoudre de ce type de problèmes. Ces modèles représentent les comportements des agents en termes d'offre et de demande en fonction des prix en intégrant les interactions possibles entre les différents produits et une description des échanges internationaux. Ces comportements donnés, le système de prix qui assure l'équilibre entre offre et demande simultanément sur l'ensemble des marchés (pour l'ensemble des produits et des régions) peut être calculé. Il détermine les surfaces utilisées et les quantités que les agents produisent, consomment et échangent à l'équilibre. L'application d'un choc sur la demande (par exemple via l'introduction d'une contrainte sur un taux d'incorporation minimal) modifie l'ensemble des prix d'équilibre. Plutôt que d'analyser la cascade d'effets et de rétroactions décrite à la Figure 5, les modèles économiques reposent ainsi sur une approche de *statique comparative* consistant à comparer les prix et quantités d'équilibre « avec » et « sans » choc.

Ce dernier point est particulièrement important pour rendre compte de l'effet des CAS dus au développement des biocarburants. En effet, il est impossible en pratique d'isoler ces effets (notamment indirects) à partir des seules observations. Pour déterminer les CAS imputables au seul développement des biocarburants, il est donc nécessaire de comparer, *toutes choses égales par ailleurs*, des jeux de simulations « avec » et « sans » développement des biocarburants. La statique comparative se prête aisément à ce type d'analyses.

La raison essentielle de l'apparente complexité décrite à la Figure 5 est l'absence d'un système de prix permettant d'assurer l'équilibre simultané sur l'ensemble des marchés. De ce point de vue, les modèles économiques sont, par construction, clairement mieux armés pour rendre compte des conséquences en termes d'intensification, de substitution et d'expansion induites par le jeu du marché. Prises sous le seul angle des quantités, les interactions nombreuses entre les différentes cultures à la fois du côté de la demande et de l'offre sont plus difficiles à appréhender dans une ACV conséquentielle.

La cohérence d'ensemble dans les ACV conséquentielles est assise sur la description fine des processus techniques et environnementaux, qui sont considérés comme fixes. Du côté des modèles économiques, elle est assurée par la cohérence des comportements économiques. La représentation de ces comportements repose en grande partie sur l'estimation des élasticités qui déterminent la réponse des agents en termes d'offre et de demande. A l'inverse, rien ne garantit *a priori* que les différentes hypothèses prises dans les ACV conséquentielles (par exemple en termes d'expansion et de substitution) soient cohérentes au regard d'un comportement économique rationnel.

Les différences de résolution dans les deux approches ont également des conséquences importantes. La nature descendante (*top-down*) des modèles économiques privilégie une représentation plus agrégée des mécanismes à l'œuvre. En particulier, pour la grande majorité d'entre eux, la description des CAS n'est pas spatialement explicite. Conformément à la logique de statique comparative, les CAS sont donc obtenus par différence entre deux allocations des sols à un grain spatial relativement grossier (le pays ou un regroupement de pays en quelques grandes régions au niveau mondial). En conséquence, les CAS obtenus sont des CAS *nets* et il n'est pas possible (ou au prix d'hypothèses très fortes) de séparer les effets directs des effets indirects. Cette distinction est possible dans les ACV conséquentielles dans la mesure où les CAS<sub>d</sub> et CAS<sub>i</sub> sont directement déduits des hypothèses qui sont faites à chaque étape de la chaîne causale. Si l'information sur le poids respectifs des CAS<sub>d</sub> et des CAS<sub>i</sub> dans l'effet total n'est pas nécessaire pour évaluer sur les émissions de GES, elle peut néanmoins être utile pour certaines dispositions de politiques publiques qui visent essentiellement à limiter les CAS<sub>d</sub>.

En outre, les modèles économiques requièrent des paramètres comportementaux (élasticités-prix de l'offre et de la demande, équations de transmission des prix mondiaux aux prix domestiques, élasticités de substitution des imports relativement à la production domestique, etc...) qui ne sont pas directement

observables et doivent donc être estimés. Cela impose de recourir à des données économiques souvent très agrégées. Par ailleurs, l'accent mis sur les substitutions (notamment du côté de l'offre) exclut de s'appuyer sur une représentation linéaire simple de type Leontief. Il en résulte une description plus souple, mais aussi beaucoup plus frustrante des processus techniques que celle qui prévaut dans les ACV conséquentielles.

Le Tableau 1 synthétise les principales différences dans les choix méthodologiques des modèles économiques et ACV attributives et conséquentielles.

	ACV attributives	ACV conséquentielles	Modèles économiques
Description des processus techniques	Fine, représentation linéaire de type Leontief, dont la paramétrisation peut s'appuyer sur des bases de données détaillées de références techniques		Plus frustrante, l'offre est représentée par des fonctions de production qui tiennent compte des substitutions et qui sont estimées sur données économiques agrégées
Normalisation	Forte		Plus faible. Le recours à des bases de données communes (par exemple GTAP) permet néanmoins une certaine harmonisation.
Transparence	Forte		Plus faible compte tenu du nombre de paramètres comportementaux estimé et/ou calibrés
Résolution	Au niveau du processus/de la filière		Agents représentatifs au niveau national ou de quelques grandes régions dans le monde
Echelle	Ensemble de la filière	Ensemble des filières affectées par les effets indirects	Globale, ensemble des productions agricoles (et du reste de l'économie pour les modèles d'équilibre général)
Prise en compte des CASd ?	Oui		Oui, pas de décomposition entre CASd et CASi
Prise en compte des CASi ?	Non	Oui	
Maintien de l'équilibre offre/demande ?	Non	Non garanti	Oui par construction
Effets sur les marchés (prix et quantités) ?	Non	Raisonnement uniquement sur les quantités	Oui par construction
Cohérence des comportements économiques ?	Non	Non garanti	Oui par construction

**Tableau 1** : Comparaison des approches fondées sur l'ACV et de celles fondées sur les modèles économique d'équilibre pour l'évaluation des effets du développement de la biomasse sur CAS.

Certaines des différences illustrées dans le Tableau 1 peuvent en partie expliquer les divergences de résultats observées dans la section précédente. Ne raisonnant que sur des quantités, les ACV conséquentielles nécessitent un nombre important d'hypothèses pour rendre compte des effets (notamment indirects) sur les CAS. Ce nombre croît rapidement avec la complexité des interactions entre les cultures et des boucles de rétroaction qui passent par les marchés à la fois nationaux et internationaux. Il est vraisemblable que les modèles économiques, mieux armés dans ce domaine, soient plus à même de représenter de manière plus complète les conséquences directes et indirectes des ajustements de marchés sur les CAS. Toutefois, cet argument n'épuise pas les termes de cette comparaison. En particulier, la possibilité de s'appuyer sur une description des processus plus fine, plus normalisée et plus proche des réalités techniques tout en maintenant la cohérence des comportements et des équilibres économiques ouvrent des perspectives intéressantes de dialogue entre deux approches qui se sont, jusqu'ici, développées très largement de manière parallèle.

#### **4. Prise en compte des CAS dans le développement de la biomasse au sens large**

Les résultats présentés et les discussions menées jusqu'ici ont principalement porté sur les effets du développement des biocarburants sur les CAS et sur leurs conséquences en termes d'émissions de GES. Quels enseignements peut-on en tirer sur l'évaluation environnementale d'une mobilisation accrue de la biomasse et des bio-ressources au sens plus large ?

Il convient tout d'abord de garder à l'esprit les spécificités du cas des biocarburants. Tout d'abord, une très grande majorité des résultats obtenus dans la littérature et recensés dans De Cara *et al.* (2012) concernent des biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération. Ils correspondent donc essentiellement à des matières premières déjà largement utilisées pour l'alimentation avec laquelle les usages énergétiques sont susceptibles d'entrer directement en concurrence. De plus, les volumes concernés par les politiques ambitieuses mises en œuvre dans plusieurs pays au cours des années 2000 (UE, USA, Brésil, Chine,...) pour développer la production et l'usage des biocarburants sont importants. Ces volumes ont mobilisé des surfaces, qui même elles ne représentent qu'une fraction faible de la surface agricole mondiale (environ 1% en 2004, Smith *et al.* 2010), sont importantes dans un contexte de tension sur la demande alimentaire mondiale. Plusieurs éléments ont donc convergé pour que la concurrence entre les usages alimentaires et énergétiques soit forte.

Une telle conjonction ne vaut pas pour toutes les bio-ressources. En particulier, la valorisation des résidus et des déchets ou la mobilisation de biomasse n'entrant pas directement en concurrence avec les autres usages des terres (par exemple issue d'algues ou de cultures dédiées produites sur des terres non utilisées) sont susceptibles de limiter les CAS directement et indirectement. Voir par exemple Havlik *et al.*, 2011, pour une évaluation de l'effet sur les CAS de la prise en compte de la possibilité d'utiliser des cultures dédiées et/ou des résidus forestiers pour les biocarburants de 2<sup>ème</sup> génération. Symétriquement, une utilisation plus efficace des ressources en place, que ce soit dans le secteur agricole par des rendements plus élevés ou dans celui de la transformation, contribue également limiter la pression sur le foncier et les CAS (Dumortier *et al.*, 2011).

Il reste que, dès lors que les bio-ressources nécessitent de la terre pour être produites, la concurrence possible entre ces nouveaux usages et les usages existants doit être prise en compte. L'évaluation de ces effets ne doit pas se limiter aux effets directs sur les CAS que peuvent fournir les ACV attributives, mais tenir compte de l'ensemble des rétroactions qui peuvent affecter les usages des sols. Les modèles économiques d'équilibre sont mieux à même de rendre en compte de l'ensemble des rétroactions passant par le marché que ne le sont les ACV conséquentielles. La difficulté est alors de représenter correctement les processus techniques nouveaux ou émergents dans la structure *top-down* qui caractérise les modèles économique. Un effort important a été fait dans les années récentes pour mieux intégrer le secteur foncier dans les modèles économiques, avec une attention particulière portée sur les déterminants économiques des conversions entre les différents usages et une représentation de

plus en plus fine de l'hétérogénéité spatiale des ressources en terres. Un effort similaire doit être entrepris sur la description des processus techniques de transformation et de valorisation de la biomasse au-delà du seul secteur des biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération.

L'évaluation des effets des CAS sur l'environnement nécessite également d'être approfondie. La comptabilisation des variations de stocks de carbone dans les sols repose encore largement sur des relations relativement sommaires qui négligent en grande partie la dimension dynamique du stockage et du déstockage de carbone. Par ailleurs, de nombreuses incertitudes entourent encore la comptabilisation des différentes sources d'émissions de GES (carbone des sols, N<sub>2</sub>O, éventuellement CH<sub>4</sub> pour ce qui relève de l'alimentation animale et du stockage des déchets). Ces incertitudes rendent difficiles l'appréciation de l'effet net des différents arbitrages en jeu. A titre d'exemple, l'intensification permet de limiter l'expansion et donc les CAS et les émissions de CO<sub>2</sub> afférentes, mais peut être à l'origine d'émissions de N<sub>2</sub>O supplémentaires si elle nécessite plus d'engrais azotés. Une meilleure description des phénomènes biologiques sous-jacents est nécessaire pour mieux représenter ces arbitrages.

Enfin, il est clair que les effets environnementaux liés aux CAS ne se limitent pas au seul problème de l'effet de serre. Les conséquences en termes de biodiversité, de ressources en eau (tant qualitativement que quantitativement), de qualité des sols, etc. des CAS, si elles sont plus difficiles à mesurer, sont également des éléments déterminants du bilan environnemental des biocarburants. Le nombre de références sur ces aspects est encore trop faible à l'heure actuelle pour tirer des conclusions robustes. De plus, ces enjeux environnementaux, plus locaux et/ou plus disparates que l'enjeu climatique, se prêtent moins facilement à l'agrégation dans un indicateur unique.

## Conclusion

Le développement du recours à la biomasse s'est construit autour de l'ambition de tendre vers une utilisation plus efficace des ressources naturelles basée sur un fonctionnement plus circulaire de l'économie qui permettrait de s'affranchir des contraintes de disponibilité des ressources fossiles tout en limitant la pression sur l'environnement. L'exemple des biocarburants a montré que ce cercle vertueux, en se heurtant à une contrainte non anticipée au départ, celle de l'offre de terres, pouvait engendrer des effets induits susceptibles de remettre en cause l'effet environnemental recherché au départ. Est-ce à dire que le développement du recours à la biomasse est forcément néfaste d'un point de vue environnemental dès que sont pris en compte les usages des sols ? La réponse est évidemment non.

Tout d'abord, s'il n'entre pas en concurrence avec les autres usages et qu'il se substitue effectivement à des ressources fossiles, le développement de la biomasse participe d'une utilisation efficace des ressources et, à ce titre, contribue effectivement à relâcher la contrainte pesant sur les ressources de carbone non renouvelable.

De plus, la littérature sur les liens entre CAS, biomasse et environnement reste relativement récente. L'ampleur des politiques visant à promouvoir la production et l'utilisation des biocarburants a beaucoup contribué à faire évoluer à la fois modèles économiques et approches basées sur l'ACV dans le sens d'une meilleure prise en compte des CAS et de leurs conséquences sur l'effet de serre. Même si cet effort de modélisation a contribué à réduire les incertitudes, des recherches sont encore nécessaires pour améliorer la représentation (parfois frustrante) des interactions entre phénomènes biophysiques, techniques et économiques à l'œuvre. Cet effort devra passer notamment par une meilleure articulation entre modèles économiques et analyses basées sur l'ACV, ces deux approches s'étant jusqu'ici largement développées séparément.

Enfin, l'effort de recherche s'est principalement concentré dans les cinq dernières années sur les biocarburants de 1<sup>ère</sup> génération et les conséquences sur le bilan net en termes de GES. Il doit être étendu aux autres utilisations de la biomasse pour lesquelles le problème des CAS ne pose pas nécessairement de la même manière selon les filières et à d'autres enjeux environnementaux.

## Références bibliographiques

- ADEME, 2010. Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France'. Rapport Final, ADEME.
- Al-Riffai P., Dimaranan B., Laborde D., 2010. Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate. Final report, European Commission, IFPRI, ATCLASS Consortium. Specific Contract No SI2.537.787.
- Bauen A., Chudziak C., Vad K., Watson P., 2010. A causal descriptive approach to modelling the GHG emissions associated with the indirect land use impacts of biofuels. Final report, E4Tech, UK Department for Transport.
- Cherubini F., Bird N.D., Cowie A., Jungmeier G., Schlamadinger B., Woess-Gallasch S., 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling* 53(8), 434-447.
- Commission Européenne, 2012. Proposition de directive modifiant la directive 98/70/CE concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel et modifiant la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. COM(2012) 595, Bruxelles, Belgique.
- Cour des Comptes, 2012. La politique d'aide aux biocarburants. Rapport public thématique, 259 p., Paris, France.
- De Cara S., Gabrielle B., Goussebaille A., Grateau, R., Levert, F., Quemener J., 2012. Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants. Rapport final pour l'ADEME. INRA UMR Economie Publique, Grignon, France, 96 p.
- Dumortier J., Hayes D. J., Carriquiry M., Dong F., Du X., Elobeid A., Fabiosa J. F., Tokgoz, S., 2011. Sensitivity of Carbon Emission Estimates from Indirect Land-Use Change, *Applied Economic Perspectives and Policy* 33(3), 428-448.
- Havlik P., Schneider U.A., Schmid E., Böttcher H., Fritz S., Skalský R., Aoki K., De Cara S., Kindermann G., Kraxner F., Leduc S., McCallum I., Mosnier A., Sauer T., Obersteiner M., 2011. Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy* 39(10), 5690-5702.
- Hertel T.W., Golub A. A., Jones A.D., O'Hare M., Plevin, R.J., Kammen D.M., 2010. Effects of US Maize Ethanol on Global Land Use and Greenhouse Gas Emissions: Estimating Market-mediated Responses, *BioScience* 60(3), 223-231.
- Hertel T.W., Rose S., Tol R.S.J. (ed), 2009. *Economic Analysis of Land Use in Global Climate Change Policy*. Routledge, New York, NY, USA.
- Keeney R., Hertel T.W., 2009. The Indirect Land Use Impacts of United States Biofuel Policies: The Importance of Acreage, Yield, and Bilateral Trade Responses. *American Journal of Agricultural Economics* 91(4), 895-909.
- Kløverpris J., Wenzel H., Nielsen P.H., 2008. Life Cycle Inventory Modelling of Land Use Induced by Crop Consumption. Part 1: Conceptual Analysis and Methodological Proposal. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13(1), 13-21.
- Laborde D., 2011. Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies', Final Report. European Commission. IFPRI, Washington, DC, USA.
- Laborde D., Valin H., 2012. Modeling land-use changes in a global CGE: assessing the EU biofuel mandates with the Mirage-Biof model. *Climate Change Economics* 3(3). DOI: 10.1142/S2010007812500170.
- Leontief W., 1966. *Input-Output Economics*, Oxford University Press, Oxford, 1966.
- Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. (ed.), 2003. IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry, IGES, Japan.
- Plevin R.J., O'Hare M., Jones A.D., Torn M.S., Gibbs H.K., 2010. Greenhouse Gas Emissions from Biofuels? Indirect Land Use Change Are Uncertain but May Be Much Greater than Previously Estimated. *Environmental Science & Technology* 44, 8015-8021.



Reinhard J., Zah R., 2011. Consequential life cycle assessment of the environmental impacts of an increased rape methylester (RME) production in Switzerland. *Biomass and Bioenergy* 35(6), 2361-2373.

Schmidt J.H., 2008. System delimitation in agricultural consequential LCA. Outline of methodology and illustrative case study of wheat in Denmark. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13(4), 350-364.

Searchinger T., Heimlich R., Houghton R.A., Dong F., Elobeid A., Fabiosa J., Tokgoz S., Hayes D., Yu T.-H., 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science* 319, 1238-1240.

Smith P., Gregory P.J., van Vuuren D., Obersteiner M., Havlik P., Rounsevell M., Woods J., Stehfes E., Bellarby J., 2010. Competition for land. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 365(1554), 2941-2957.

Taheripour F., Tyner W.E., 2013. Induced Land Use Emissions due to First and Second Generation Biofuels and Uncertainty in Land Use Emission Factors. *Economics Research International*. DOI: 10.1155/2013/315787.

Union Européenne, 2009a. Directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. 23 avril 2009. *Journal officiel de l'Union Européenne* L140, 16-62.

Union Européenne, 2009b. Directive 2003/30/CE spécifications relatives à l'essence, au carburant diesel et aux gazoles ainsi que l'introduction d'un mécanisme permettant de surveiller et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. 23 avril 2009. *Journal officiel de l'Union Européenne* L140, 88-113.

Villoria N.B., Hertel T.W., 2011. Geography Matters: International Trade Patterns and the Indirect Land Use Effects of Biofuels', *American Journal of Agricultural Economics* 93(4), 919-935.