

# Le changement d'affectation des sols induit par la consommation européenne de biodiesel : une analyse de sensibilité aux évolutions des rendements agricoles

Alexandre GOHIN

**Working Paper SMART – LERECO N°13-07**

June 2013

*Les Working Papers SMART-LERECO ont pour vocation de diffuser les recherches conduites au sein des unités SMART et LERECO dans une forme préliminaire permettant la discussion et avant publication définitive. Selon les cas, il s'agit de travaux qui ont été acceptés ou ont déjà fait l'objet d'une présentation lors d'une conférence scientifique nationale ou internationale, qui ont été soumis pour publication dans une revue académique à comité de lecture, ou encore qui constituent un chapitre d'ouvrage académique. Bien que non revus par les pairs, chaque working paper a fait l'objet d'une relecture interne par un des scientifiques de SMART ou du LERECO et par l'un des deux éditeurs de la série. Les Working Papers SMART-LERECO n'engagent cependant que leurs auteurs.*

*The SMART-LERECO Working Papers are meant to promote discussion by disseminating the research of the SMART and LERECO members in a preliminary form and before their final publication. They may be papers which have been accepted or already presented in a national or international scientific conference, articles which have been submitted to a peer-reviewed academic journal, or chapters of an academic book. While not peer-reviewed, each of them has been read over by one of the scientists of SMART or LERECO and by one of the two editors of the series. However, the views expressed in the SMART-LERECO Working Papers are solely those of their authors.*

---

**Le changement d'affectation des sols induit par la consommation  
européenne de biodiesel : une analyse de sensibilité aux évolutions des  
rendements agricoles**

Alexandre GOHIN

*INRA, UMR1302 SMART, F-35000 Rennes, France*

**Remerciements / Acknowledgments**

*L'auteur remercie son collègue Alain Carpentier (UMR SMART INRA Rennes) pour ses encouragements et les nombreuses stimulantes discussions sur la modélisation du comportement des agriculteurs et des technologies agricoles.*

**Auteur pour la correspondance / Corresponding author**

**Alexandre Gohin**

INRA, UMR SMART

4 allée Adolphe Bobierre, CS 61103

35011 Rennes cedex, France

Email: [alexandre.gohin@rennes.inra.fr](mailto:alexandre.gohin@rennes.inra.fr)

Téléphone / Phone: +33 (0)2 23 48 54 06

Fax: +33 (0)2 23 48 53 80

*Les Working Papers SMART-LERECO n'engagent que leurs auteurs.  
The views expressed in the SMART-LERECO Working Papers are solely those of their authors*

## **Le changement d'affectation des sols induit par la consommation européenne de biodiesel : une analyse de sensibilité aux évolutions des rendements agricoles**

### **Résumé :**

L'action publique européenne sur le biodiesel est aujourd'hui contestée. Les estimations du changement induit d'affectation des sols concluent à son inefficacité pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Nous montrons que les évolutions de rendements agricoles dans ces estimations sont très faibles par rapport aux évolutions observées et aux projections actuelles. Ces résultats découlent de choix contestables de calibrage des paramètres comportementaux. Nous montrons, avec le cadre GTAP-BIO, qu'un calibrage plus consistant de ces paramètres conduit à une forte diminution (de l'ordre de 80% à long terme) du changement d'affectation des sols et des émissions associées.

**Mots-clés :** Biocarburants, Politique européenne, Changement d'affectation des sols

**Classification JEL :** Q11, Q15, Q48

## **The land use changes of European biodiesel: sensitivity to crop yield evolutions**

### **Abstract:**

The European public policy in favor of the biodiesel consumption is highly debated. Available estimates of the induced land use changes conclude that this policy is inefficient to reduce emissions of GreenHouse Gas. We show that the crop yield evolutions in these estimates are significantly lower than the observed and expected evolutions. This difference is directly related to biased calibration choice of behavioral parameters. We show using the GTAP-BIO framework that a consistent calibration of these parameters leads to a strong reduction (by around 80% in the long run) of the land use changes and induced emissions.

**Keywords:** Biofuel, Europe, Land use changes

**JEL classifications:** Q11, Q15, Q48

## **Le changement d'affectation des sols induit par la consommation européenne de biodiesel : une analyse de sensibilité aux évolutions des rendements agricoles**

### **1. Motivations**

L'action publique européenne en faveur de la consommation de biocarburant a réellement débutée en 1992 lors d'une première réforme de la Politique Agricole Commune. A cette époque, l'Europe imposait à ces agriculteurs de mettre en jachère une partie de leurs surfaces afin de limiter ses excédents de produits agricoles. Les surfaces gelées pouvaient tout de même être consacrées à des productions non alimentaires, dont celles des biocarburants. Cette action a ensuite été amplifiée d'abord en 2003 puis en 2009 à travers les directives européennes de promotion des énergies renouvelables et de la qualité des carburants. Ces directives fixent notamment des objectifs d'incorporation de biocarburants dans le secteur du transport terrestre, les Etats membres devant mettre en œuvre des instruments politiques incitatifs pour atteindre ces objectifs. Elles imposent simultanément des critères de durabilité, tout particulièrement des critères sur la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre (GES).

Cette action publique européenne est néanmoins aujourd'hui très contestée et son avenir très incertain, tout au moins pour le biodiesel et dans une moindre mesure pour le bioéthanol. Tout d'abord à la suite de la crise alimentaire mondiale de 2007, il lui est reproché d'avoir contribué à la flambée des cours mondiaux de nombreux produits agricoles, dont les huiles végétales. Elle est aujourd'hui surtout contestée pour sa faible efficacité, voire son inefficacité, en termes de réduction des émissions nettes de GES. Même si les émissions directes liées à la consommation de biocarburants ne sont pas connues avec certitude, c'est surtout l'ampleur des émissions liées au changement d'affectation des sols (CAS) avec une extension des surfaces arables sur des sols riches en carbone qui fait débat. Ainsi l'action publique européenne a réellement débuté dans un contexte de disponibilité de surfaces arables en Europe et est aujourd'hui contestée par le manque de disponibilité de ces surfaces au niveau mondial qui conduit à un potentiel retournement de sols riches en carbone (prairies, forêts, tourbières).

Ce CAS vient de ce qu'une consommation supplémentaire de biocarburants est en effet susceptible de conduire à des surfaces supplémentaires cultivées dans la culture correspondante (en l'occurrence des graines oléagineuses pour la production d'huiles dans le

cas du biodiesel). Mais le nombre d'hectares supplémentaires effectivement cultivés (en graines oléagineuses) va dépendre des possibilités de réduction des autres demandes (demande humaine d'huiles), d'intensification des rendements sur les surfaces déjà allouées à ces productions ou encore de la valorisation des co-produits (tourteaux issus de la production d'huiles). Par ailleurs, le nombre d'hectares supplémentaires cultivés au total va aussi dépendre des répercussions sur les autres marchés des produits agricoles et les surfaces consacrées (par exemple les surfaces céréalières ou sucrières).

Le CAS induit par le développement de biocarburants résulte donc de l'interaction de plusieurs mécanismes économiques. Il ne peut pas être directement calculé à partir des observations des surfaces agricoles mondiales pour la simple raison que ces surfaces évoluent sous l'influence de multiples autres facteurs (telles que l'évolution de la demande alimentaire, l'évolution des technologies agricoles, etc.). C'est pourquoi de nombreux travaux de modélisations des marchés mondiaux des produits agricoles, quantifiant les mécanismes économiques précédemment identifiés, ont été poursuivis ces dernières années. Nombre de ces travaux portent sur la mesure des CAS induits par la politique américaine de biocarburants, un nombre plus réduit sur les effets CAS induits par la politique européenne (de récentes revues sont fournies dans De Cara *et al.*, 2012 et Broch *et al.*, 2013).

Tous ces travaux de modélisation reposent par définition sur des hypothèses qui sont généralement testées pour valider la robustesse des principaux résultats. L'objectif général de ce papier est de tester la robustesse des évaluations disponibles du CAS et des émissions associées de GES induits par la consommation européenne de biodiesel aux hypothèses sur les évolutions de rendements.

Nous centrons notre analyse sur la consommation européenne de biodiesel pour deux raisons principales. D'une part, il s'agit du principal biocarburant aujourd'hui consommé en Europe et qui va vraisemblablement le rester dans les prochaines années. Le parc automobile européen est essentiellement diesel et son éventuelle évolution vers plus de moteurs essence ne se fera que progressivement. D'autre part, la revue de littérature conduite par la Commission Européenne (CE, 2012) révèle que les évaluations jugées pertinentes des effets CAS et des émissions associées de GES sont nettement plus convergentes pour le biodiesel que pour le bioéthanol<sup>1</sup>. Ainsi ces émissions induites varient entre (approximativement) 50 et

---

<sup>1</sup> Plus précisément, voir la figure 3 de la page 13 dans l'analyse d'impact accompagnant la proposition de révision des directives européennes relatives aux biocarburants (CE, 2012).

100 gCO<sub>2</sub>eq/MJ pour le biodiesel, la majorité des évaluations se situant autour de 55 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. A l'inverse, les évaluations pour le bioéthanol sont relativement dispersées entre 0 et 200 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. Ceci implique que les résultats d'une analyse de sensibilité des effets CAS et émissions associées de GES aux hypothèses d'évolution des rendements sont moins susceptibles de dépendre du cadre de modélisation retenu dans le cas du biodiesel.

Deux raisons principales également justifient notre attention sur les hypothèses relatives aux évolutions de rendements. D'une part, les analyses de sensibilité conduites sur les évaluations de la politique américaine de biocarburants concluent que les résultats sont principalement dépendants de ces hypothèses sur les évolutions de rendements (Dumortier *et al.*, 2011, Golub and Hertel, 2012). D'autre part, parmi l'ensemble des mécanismes économiques susmentionnés qui influencent la quantification des effets CAS et émissions associées de GES, les évolutions de rendements ne sont pas les plus difficiles à valider. En effet les observations sur les surfaces, productions et rendements des principales cultures dans les principaux pays producteurs sont en général nettement plus nombreuses et considérées plus fiables que les observations sur les niveaux de demandes humaines et animales par exemple. En effet, ces dernières ne sont généralement disponibles que pour un certain nombre de produits (les consommations de fourrage dans l'alimentation des herbivores sont très rarement renseignées) et par ailleurs les niveaux de ces demandes sont très majoritairement calculés par solde dans les bilans de marché (cumulant alors les éventuelles erreurs sur les autres postes des bilans comme les variations de stock). En d'autres termes, même s'il est toujours possible et souhaitable de les améliorer, la mesure des évolutions de rendements est relativement plus aisée que la mesure des autres mécanismes économiques impactant la quantification des effets CAS.

Ce papier est structuré en deux sections. Dans une première section, nous conduisons une nouvelle revue de littérature centrée sur les évolutions de rendements imposés ou obtenus dans les évaluations des effets CAS induits par la consommation européenne de biodiesel. Cette revue de littérature inclut naturellement l'étude IFPRI et le modèle sous jacent MIRAGE-BioF (Laborde, 2011). C'est en effet celle qui est retenue par la CE pour justifier ses propositions de révision des directives européennes pour les biocarburants. Nous montrons dans cette première section que les évolutions de rendements obtenus dans ces travaux sont généralement très faibles au regard des évolutions des rendements observées sur longue période et également au regard des évolutions projetées de ces rendements. Nous montrons aussi que cela résulte de choix contestables de calibrage des paramètres. Ceci nous

conduit à tester dans une deuxième section, les impacts sur les CAS et les émissions associées d'une évolution plus consistante de ces effets rendements. Cette analyse de sensibilité est conduite avec le modèle GTAP-BIO qui a notamment servi pour la mesure des effets de la politique américaine de biocarburants par l'agence californienne de protection de l'environnement (CARB, 2010). Même s'il ne s'agit pas du cadre de modélisation privilégié par la CE, sa structure et les résultats sont proches de ceux obtenus par le cadre MIRAGE-BioF. Surtout il présente l'avantage d'être publiquement disponible, ce qui permet l'analyse de sensibilité de ces résultats à différentes hypothèses. Nous montrons alors qu'un calibrage plus consistant des paramètres qui affectent directement les évolutions de rendements conduit à une forte diminution des effets CAS et des émissions associées de GES induits par la consommation européenne de biodiesel.

## **2. Le biodiesel européen et les évolutions de rendements : revue de littérature**

Ces dernières années, le débouché offert par les biocarburants est passé de marginal à significatif pour certains marchés agricoles mondiaux, comme pour le maïs (principalement sous le fait de la consommation américaine de bioéthanol) ou le colza (principalement sous le fait de la consommation européenne de biodiesel). Les modélisations économiques des marchés agricoles ont dès lors progressivement intégré ces nouvelles demandes dans leurs équilibres, d'abord pour mesurer les implications en termes d'évolution des prix (et leur contribution aux crises alimentaires) puis pour mesurer les effets sur les surfaces et les émissions associées de GES.

De nombreuses équipes de modélisation ont été sollicitées pour fournir des estimations des effets CAS liées aux consommations européennes de biocarburants (Edwards *et al.*, 2010). Il apparaît que, bien qu'ils aient introduit le débouché des biocarburants, certains modèles ne sont pas réellement adaptés pour mesurer ces effets CAS et émissions associées de GES. C'est notamment le cas des modèles initialement centrés sur l'Europe avec une représentation assez fruste des régions non européennes. Il s'agit en particulier des modèles d'équilibre partiel CAPRI et ESIM que les services de la CE ont mobilisé pour quantifier les effets européens (Blanco Fonseca *et al.*, 2010). C'est aussi le cas des modèles n'ayant pas une représentation explicite des marchés des co-produits, tel le modèle d'équilibre général LEITAP, ou du marché de la terre, tel le modèle d'équilibre général DART (voir Edwards *et al.*, 2010). Si par ailleurs on exclut les modèles qui n'offrent pas une analyse du secteur du biodiesel et



seulement celui du bioéthanol (tel le modèle IMPACT de l'IFPRI), notre revue de littérature se limite alors aux résultats fournis par 4 cadres de modélisation. Elle inclut deux cadres d'équilibre partiel avec le modèle FAPRI de l'université d'Iowa et le modèle AGLINK COSIMO conjointement développé par l'OCDE et la FAO. Elle inclut également deux cadres d'équilibre général avec le modèle GTAP-BIO développé par l'université de Purdue et le modèle MIRAGE-BioF développé par l'IFPRI.

Nous décrivons ci-dessous pour chacun de ces cadres de modélisation les principales hypothèses relatives à la spécification des rendements et commentons les principaux résultats (notamment ceux des simulations de comparaison reportés dans Edwards *et al.*, 2010).

## **2.1. Le cadre FAPRI**

Il s'agit d'un cadre d'équilibre partiel développé en partie par l'équipe CARD de l'Université d'Iowa. Ce modèle est régulièrement utilisé pour faire des projections des marchés mondiaux des produits agricoles et analyser des réformes de politiques agricoles. Il a en particulier été utilisé à plusieurs reprises pour quantifier les effets de la politique américaine de biocarburants et à la demande des services de la CE pour quantifier les effets de la politique européenne de biocarburants.

Les spécifications des productions, surfaces et rendements varient selon les régions et les cultures et par ailleurs ont évolué avec les versions du modèle (Elobeid *et al.*, 2012). Les premières versions supposaient que les rendements évoluaient de manière exogène, et par conséquent que les prix n'avaient aucun impact à l'exception des Etats-Unis. Dans ce pays, les rendements dépendaient négativement des surfaces allouées aux cultures, ces dernières évoluant sous l'influence des prix. En revanche, l'effet direct positif des prix sur les incitations à changer les rendements, en ajustant les intrants variables par exemple, est absent. Par définition, une augmentation du prix d'une seule culture conduit automatiquement à une baisse de son rendement, du fait de l'augmentation des surfaces américaines allouées à cette culture.

Les spécifications des rendements ont été révisées dans les récentes versions quantifiant les effets des politiques de biocarburants avec d'une part l'introduction d'effets prix (marges) positifs et d'autre part la généralisation des effets surfaces négatifs dans toutes les régions (Edwards *et al.*, 2010). Les élasticités effectivement imposées ne sont pas indiquées si bien qu'il nous est impossible d'apprécier ex ante les effets rendements introduits.

La simulation d'un choc de la consommation de biodiesel en Europe conduit à un CAS mondial de 437 milliers d'hectares pour chaque million de tonnes équivalent pétrole (tep), soit 0,44 ha/tep. La majorité des surfaces arables supplémentaires provient de l'Inde et de manière assez marginale de l'Europe. Au niveau mondial, les surfaces arables additionnelles conduisent à un accroissement de la production arable totale mais une diminution très modeste des rendements globaux. En effet ceux-ci diminuent de 0,008% alors que les surfaces arables mondiales augmentent de l'ordre de 0,05%.<sup>2</sup> Cette diminution des rendements globaux s'explique essentiellement par le déplacement de la production mondiale de cultures vers des zones à faibles rendements initiaux (l'Inde). Au niveau de chaque zone, les rendements évoluent de manière marginale, voire sont stables pour la culture de colza qui est la plus impactée par le choc. Pour les rendements de cette culture, l'effet négatif de l'augmentation des surfaces est donc juste compensé par l'effet positif de l'évolution des prix.

Ces évolutions divergentes des surfaces et des rendements au niveau mondial liées à la consommation européenne de biodiesel tranchent singulièrement avec les projections établies par le FAPRI à l'horizon 2020. Toutes productions arables confondues, il est en effet projeté entre 2010 et 2020 une augmentation des surfaces arables mondiales de 3,1% et également des rendements de 7,9%. En d'autres termes, 70% de la production supplémentaire de cultures arables projetée à l'horizon de 10 ans sera obtenue grâce à des augmentations de rendements et seulement à hauteur de 30% par des surfaces additionnelles. Ces proportions varient avec les cultures, avec par exemple des parts liées aux rendements de l'ordre de 82% pour le blé et 45% pour le soja.

Ces différences s'expliquent par le fait que les rendements évoluent pour une très large part de manière indépendante sous l'effet d'un progrès technique exogène dans la projection alors que ce progrès technique exogène est absent dans la simulation de la politique. Seuls les effets induits des prix sur les rendements sont pris en compte et apparaissent très limités dans la simulation. Ceci pose la question de l'origine exacte du progrès technique dans la phase de projection et également de son absence lorsque les effets de long terme des politiques de biocarburants sont quantifiés.

Même s'ils ne portent pas sur le cas européen du biodiesel, il est intéressant de reporter les résultats de l'analyse de sensibilité effectuée par Dumortier *et al.* (2011) sur le bioéthanol

---

<sup>2</sup> Les projections FAPRI établies en 2010 pour 2020 indiquent une surface arable mondiale de 862754 milliers d'hectares.

américain avec ce cadre FAPRI. Ces auteurs comparent les effets CAS et émissions associées de GES avec et sans prise en compte d'effets prix dans les évolutions de rendements. Comme indiqué précédemment, les versions initiales du modèle FAPRI excluaient les effets rendements (comme dans l'analyse réalisée par Searchinger et al., 2008 qui a initié le débat sur le CAS). Dans une version alternative, ces auteurs introduisent des élasticités prix propre dans les rendements de l'ordre de 0,15 selon les cultures et les régions. Ces auteurs montrent alors que les estimations CAS et émissions associées de GES sont très sensibles à ces élasticités. Ainsi les émissions amorties sur 30 ans passent de 107 gCO<sub>2</sub>eq/MJ à seulement 14 gCO<sub>2</sub>eq/MJ lorsque les rendements peuvent s'ajuster avec les prix. Ces auteurs en concluent que l'efficacité de la politique américaine de biocarburants en termes de réduction des émissions de GES pourrait être améliorée par des efforts supplémentaires en recherche et développement sur les rendements agricoles.

## **2.2. Le cadre AGLINK-COSIMO**

Il s'agit également d'un cadre d'équilibre partiel qui est développé en collaboration entre l'OCDE et la FAO. Ce modèle est lui aussi régulièrement utilisé pour faire des projections des marchés mondiaux des produits agricoles et analyser des réformes de politiques agricoles. Les services de la CE ont accès à ce modèle et peuvent l'utiliser pour des projections et simulations de politique. Blanco Fonseca *et al.* (2010) l'ont par exemple mobilisé pour tester des simulations de biocarburants en Europe.

A l'inverse du cadre FAPRI, les spécifications des productions, surfaces et rendements n'ont pas été spécialement modifiées pour analyser les politiques de biocarburants. Tant les surfaces que les rendements sont spécifiés à travers des formes réduites. Les rendements sont soit exogènes (cultures marginales), soit déterminés par des fonctions iso-élastiques des prix anticipés pour les cultures correspondantes (ces prix anticipés étant supposés les prix de l'année précédente) et d'un trend capturant un progrès technique exogène. En revanche, il n'existe pas d'effets négatifs des surfaces comme dans le cadre FAPRI. Cela n'exclut pas qu'au niveau mondial, les effets rendements peuvent être négatifs si la production se déplace dans des zones à faibles rendements initiaux.

La simulation d'un choc de la consommation de biodiesel en Europe conduit à un CAS mondial de 230 milliers d'hectares pour chaque million de tep (ce chiffre prenant en compte les surfaces pour la culture de palme), soit encore 0,23 ha/tep. La majorité des surfaces

arables supplémentaires provient de l'Europe, suivie de l'Argentine et de l'Inde. Cela correspond à une augmentation des surfaces arables mondiales de 0,025%, soit moitié moins que l'estimation FAPRI. Cette différence s'explique essentiellement par l'augmentation des rendements obtenue dans le cadre AGLINK-COSIMO au niveau agrégé. Ceux-ci augmentent de 0,004%, essentiellement sous l'effet de l'augmentation des rendements céréaliers. Les rendements des cultures oléagineuses diminuent modestement (0,001%), de nouveau sous l'effet de l'expansion des surfaces en Inde.

Edwards *et al.* (2010) ont aussi calculé les élasticités *ex-post* des surfaces, rendements et productions liées à ce choc. Les résultats sont respectivement de 0,25, 0,04 et 0,29. Par conséquent, 12% de l'augmentation de la production nécessaire pour satisfaire les nouvelles demandes est obtenu par une augmentation des rendements, le reste par une augmentation des surfaces. Cette proportion tranche de nouveau fortement avec les projections établies en 2010 par l'OCDE-FAO à l'horizon 2021. Toutes productions arables confondues, il est en effet projeté entre 2010 et 2021 une augmentation des surfaces arables mondiales de 7,3% et des rendements de 14,7%. En d'autres termes, 64% de la production supplémentaire de cultures arables projetée à l'horizon de 10 ans sera obtenue grâce à des augmentations de rendements et seulement à hauteur de 36% par des surfaces additionnelles. De nouveau, ces proportions varient avec les cultures, par exemple avec des parts des rendements de l'ordre de 80% pour les cultures oléagineuses et 47% pour la culture de betteraves.

Ces différences s'expliquent de nouveau par le fait que les rendements évoluent pour une très large part de manière indépendante sous l'effet d'un progrès technique exogène dans la projection alors que ce progrès technique exogène est absent dans la simulation de la politique.

Il nous semble là aussi utile de reporter les résultats de l'analyse de sensibilité effectuée par Blanco Fonseca *et al.* (2010) avec ce cadre AGLINK-COSIMO. Ces auteurs simulent la politique européenne de biocarburants toute entière (soit un accroissement des consommations de bioéthanol et biodiesel, de respectivement 7,3 et 14,9 millions de tep). Ils obtiennent avec la version standard d'AGLINK-COSIMO une augmentation des surfaces arables mondiales de 5,2 millions d'hectares, ce qui correspond à un accroissement de 0,23 ha/tep (soit le même chiffre que celui reporté dans Edwards *et al.*, 2010). Ces auteurs testent ensuite les effets d'une accélération permanente des rendements agricoles qui est motivée par les perspectives favorables offertes par la politique européenne de biocarburants. Il est supposé de manière *ad hoc* une augmentation des rendements de l'ordre de 3 à 3,4%. Dans ce

cas, l'augmentation des surfaces arables mondiales induite par le développement des biocarburants n'est plus que de 0,187 million d'hectares (soit moins de 0,01 ha/tep).

Cette variante montre l'extrême sensibilité des résultats aux hypothèses sur l'évolution des rendements. Cependant, cette variante conduit dans le même temps à une baisse des prix des cultures. Se pose donc là aussi la question de l'origine de ces gains de rendements car les marges à l'hectare et les profits agricoles diminuent à la suite de ce choc. Les auteurs de cette étude s'interrogent également sur cette possibilité et n'explorent malheureusement pas plus de variantes. La spécification des surfaces et des rendements à travers des formes réduites ne facilite pas cette mise en cohérence, au contraire des approches structurelles telles que développées dans les modèles d'équilibre général calculable que nous examinons maintenant.

### **2.3. Le cadre GTAP-BIO**

Le cadre GTAP-BIO découle du cadre GTAP qui combine une base de données unique au monde (des matrices de comptabilité sociales cohérentes entre pays) et un modèle d'équilibre général calculable adoptant la théorie néoclassique formalisée par Arrow Debreu. Le cadre GTAP est largement utilisé pour étudier des problématiques de commerce, de pauvreté, d'énergie et d'environnement (changement climatique en particulier).

Plusieurs modifications ont été apportées à ce cadre pour permettre une analyse pertinente des politiques de biocarburants (essentiellement la politique américaine). Ces modifications portent à la fois sur la base de données (avec l'introduction des co-produits par exemple) et sur les spécifications des fonctions comportementales (avec l'introduction de technologies multi-produits par exemple). Ces différentes améliorations sont décrites dans Golub and Hertel (2012).

La spécification des fonctions d'offre, de surface et de rendements est très différente des précédentes car elle est structurelle. En effet, dans un cadre d'équilibre général, sont modélisées les décisions des producteurs en termes d'utilisation des différents intrants nécessaires à la production. Ces intrants sont distingués entre les intrants variables (produits chimiques, semences, produits énergétiques par exemple) et les facteurs de production (travail, capital et terre). Ces intrants sont combinés de manière optimale par les producteurs de telle sorte à maximiser leur profit. Ils doivent satisfaire des contraintes technologiques qui sont représentées par des fonctions de type CES (Constant Elasticity of Substitution). C'est essentiellement par l'intermédiaire des paramètres de fonctions CES (tout particulièrement

l'élasticité de substitution entre les intrants) et par l'intermédiaire des paramètres d'offre des facteurs de production (leurs élasticités de mobilité) que sont gérées les évolutions des surfaces, des autres intrants et donc des rendements dans ce type de modèle.

Puisque nous utilisons ce cadre dans la deuxième section de notre papier pour l'analyse de sensibilité et qu'il est relativement proche du cadre MIRAGE-BioF retenu par la CE pour justifier ses propositions, nous détaillons ci-dessous davantage ces spécifications des équations de surfaces, rendements et productions (elles sont pleinement décrites dans Keeney et Hertel, 2009).

Ce cadre distingue en fait 5 grands types d'inputs : le travail, le capital, la terre, les produits énergétiques et les autres inputs. Cela implique qu'en théorie, pour chaque secteur agricole dans chacune des régions, 10 élasticités de substitution peuvent être spécifiées pour arbitrer les substitutions entre ces intrants (les autres élasticités sont déterminées par les conditions théoriques de symétrie et homogénéité). Dans la pratique, il n'est spécifié que 2 élasticités de substitution du fait de leurs connaissances limitées. Il est alors imposé des séparabilités entre les intrants et une structure par étages de la fonction de production. Au plus bas niveau de la structure, une fonction CES gouverne les substitutions entre le capital et les produits énergétiques. A l'étage intermédiaire, une seconde fonction CES gouverne les substitutions entre le travail, la terre et l'agrégat composé du capital et des produits énergétiques. Enfin, au premier étage, une troisième fonction CES gouverne les substitutions entre les autres intrants variables et l'agrégat composite de la valeur ajoutée. Il est par ailleurs supposé que les deuxième et troisième fonctions CES partagent la même élasticité de substitution.

Les niveaux des paramètres d'offre des facteurs de production, qui sont également des paramètres majeurs dans l'évolution des surfaces et rendements, varient quant à eux en fonction de l'horizon de simulation considéré. A long terme, les offres des facteurs sont supposés parfaitement élastiques sauf pour la terre. Celle-ci est au contraire fixe et par ailleurs de qualité variable. Aussi sa mobilité entre les différents secteurs d'activité agricole n'est pas parfaite (concrètement tous les sols ne conviennent pas pour la production viticole et de céréales par exemple). Cette mobilité est spécifiée à travers des fonctions CET (Constant Elasticity of Transformation).

Ces différentes hypothèses du cadre GTAP-BIO impliquent les équations suivantes pour les surfaces et les productions pour une culture donnée dans une région donnée (les indices ne sont pas introduits pour ne pas alourdir inutilement les équations) :

$$l = q + \sigma(p_q - p_l) \quad (1)$$

$$p_q = s_l p_l \quad (2)$$

$$l = \varepsilon_{p_l}^l p_l \quad (3)$$

où  $q, l, p_q, p_l$  sont respectivement les variations en pourcentage de la production, de la surface, du prix à la production et la rémunération (annuelle) de la terre,  $\sigma, \varepsilon_{p_l}^l$  sont respectivement l'élasticité de substitution (qui est commune aux deux fonctions CES) et l'élasticité de l'offre de terre et enfin  $s_l$  la part initiale de la rémunération de la terre dans le coût de production. L'équation (1) exprime la demande dérivée de terre, l'équation (2) la condition de profit nul de long terme et enfin l'équation (3) l'offre de terre. Ces équations reprennent tout simplement celles de Keeney and Hertel (2009).

A partir de ces équations, l'on peut déduire les valeurs calibrées des élasticités d'offre, de surface et de rendement suite à une variation du prix du produit :

$$\varepsilon_{p_q}^q = \sigma \left( \frac{1}{s_l} - 1 \right) + \frac{\varepsilon_{p_l}^l}{s_l} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{p_q}^l = \frac{\varepsilon_{p_l}^l}{s_l} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{p_q}^y = \sigma \left( \frac{1}{s_l} - 1 \right) \quad (6)$$

Sans surprise, l'élasticité prix de l'offre est composée de deux termes, l'élasticité surface et l'élasticité rendement. Cette dernière ne dépend que de l'élasticité de substitution (équation 6) et de la part initiale de la rémunération de la terre dans le coût de production. C'est donc à travers cette élasticité de substitution que le cadre GTAP-BIO calibre les effets rendements. Ces équations montrent également que le calibrage des élasticités rendements est mené indépendamment du calibrage des élasticités surface et offre. Si l'élasticité d'offre de terre est élevée ou la part de la terre dans le coût de production est faible, alors les élasticités surface et offre sont élevées relativement à l'élasticité rendements (équation 5). Dans un tel cas, l'augmentation de production nécessaire pour satisfaire la demande liée au biocarburant est essentiellement obtenue par une augmentation des surfaces et marginalement par une augmentation des rendements.

Nous reportons dans le tableau 1 ci-dessous les valeurs de ces élasticités pour la production de graines oléagineuses dans les principaux pays producteurs. Nous calculons également les valeurs de ces élasticités au niveau mondial en pondérant chaque valeur régionale par son

poids dans la production/surface mondiale. Ces différentes valeurs sont obtenues sous l'hypothèse adoptée généralement dans le cadre GTAP-BIO d'une élasticité prix des rendements de 0,25. Pour calculer l'élasticité de l'offre de terre, nous utilisons également la valeur standard d'une élasticité de mobilité de la terre de 0,5. L'élasticité prix de l'offre de la terre est en effet égale à cette élasticité pondérée par la part, en valeur, des terres cultivées en oléagineux dans l'ensemble des terres arables. Nos calculs s'appuient donc aussi sur les parts des rémunérations de la terre dans les coûts de production pour chaque culture arable.

Dans ce tableau 1, nous fournissons également les valeurs des élasticités de substitution qui sont calibrés dans ce cadre (via l'équation 6). Ces valeurs seront modifiées dans la deuxième section de notre papier lors de l'analyse de sensibilité. Enfin, ce tableau indique la part que les élasticités rendements représentent dans les élasticités d'offre.

**Tableau 1 : Elasticités de substitution, élasticité prix propre des offres, des surfaces et des rendements des cultures oléagineuses dans le cadre GTAP-BIO**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Substitution	0,06	0,02	0,03	0,09	0,14	0,18	0,08
Offre	2,45	5,73	4,33	2,12	1,41	1,38	2,95
Surface	2,20	5,48	4,08	1,87	1,16	1,13	2,79
Rendements	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15
Contribution rendements (%)	10,22	4,36	5,78	11,77	17,79	18,13	5,24

Nous trouvons que pour tous les zones, les élasticités prix des rendements sont très largement inférieures aux élasticités surfaces (et offres). Par exemple, ces élasticités impliquent qu'en Europe, si le prix des graines oléagineuses augmente de 1%, alors la production augmente de 5,73%, l'essentiel de l'augmentation étant due à une augmentation des surfaces consacrées (5,48%) et de manière marginale une augmentation des effets rendements (0,25%). En d'autres termes, ce calibrage impose qu'au point initial, l'augmentation des rendements ne peut expliquer que 4,36% de l'augmentation de la production. Au niveau mondial, cette contribution atteint 5,24%.

De nouveau, cela est fort différent des évolutions observées ces dernières années. Ainsi, sur la dernière décennie (2000-2010), la contribution des rendements à l'augmentation de la production mondiale est de l'ordre de 20% pour le soja, 40% pour le colza et supérieure à 100% pour le tournesol, l'arachide et le coton (calculs à partir des données FAPRI). Même si



les statistiques sur les niveaux exacts de surfaces en palme sont plus controversées, les rendements apparaissent avoir contribué à l'augmentation de la production ces dix dernières années. Selon les statistiques de la FAO, ils ont contribué à 25% de l'augmentation de la production mondiale d'huile de palme.

Le calibrage des paramètres dans le cadre GTAP-BIO est donc tel que, pour des chocs marginaux, la majorité des augmentations de production est obtenue par une augmentation de surfaces et très modestement par une augmentation des rendements. Cela ne signifie pas qu'à l'issue de la simulation, les effets sont strictement donnés par ces élasticités initiales. En effet, les équations (4) à (6) montrent clairement que ces élasticités ne dépendent pas que de paramètres fixes (l'élasticité de substitution et l'élasticité de mobilité de la terre). Les valeurs des rémunérations foncières et leurs parts dans les coûts de production peuvent également changer. Par ailleurs, les calculs précédents sont réalisés sous l'hypothèse que seul le prix des graines oléagineuses change alors qu'il peut y avoir des effets croisés des prix des autres cultures. Il reste tout de même qu'avec ces hypothèses de calibrage, une augmentation marginale de production est essentiellement obtenue par une augmentation de surface et une très modeste progression des rendements.

La simulation d'un choc de la consommation de biodiesel en Europe conduit à un CAS mondial de 377 milliers d'hectares pour chaque million de tep (soit encore 0,38 ha/tep) lorsque les importations européennes de biodiesel (notamment à partir d'huile de palme) sont figées. La majorité des surfaces arables supplémentaires provient de l'Europe. De nombreuses surfaces proviennent également de l'Afrique Sub-Saharienne où les rendements sont plus faibles et où les élasticités des rendements sont, relativement aux élasticités des offres, très faibles (respectivement 0,25 et 4,70). La décomposition des effets production fournie par Edwards *et al.* (2010) indique que les rendements diminuent, ce qui contribue à augmenter les surfaces nécessaires de l'ordre de 171 milliers d'hectares. Les résultats sont donc très proches de ceux du FAPRI. De manière grossière, si les rendements n'avaient pas diminué, les surfaces supplémentaires auraient représenté environ 200 milliers d'hectares, ce qui est là très proche des résultats AGLINK-COSIMO.

Une variante est proposée dans Edwards *et al.* (2010) dans laquelle il est supposé que l'augmentation de la consommation européenne de biodiesel ne peut être fournie que par de l'huile de palme importée. Le CAS atteint dans cette variante 82 milliers d'hectares (soit 0,08ha/tep). Les surfaces supplémentaires sont essentiellement situées en Asie du Sud Est (Indonésie/Malaisie), impliquant une conversion de sols plus riche en carbone (tourbières). La

décomposition des effets production indique ici que les rendements augmentent. Grâce à ces augmentations de rendement, les surfaces ont moins augmenté (de l'ordre de 550 milliers d'hectares). Ce résultat ne nous paraît pas surprenant car nous montrons dans le tableau 1 que les élasticités des rendements sont, relativement aux élasticités d'offre, plus importantes dans cette région (respectivement 0,25 et 1,38).

Ces deux simulations montrent donc l'importance des élasticités rendements, relativement aux élasticités d'offre, dans la quantification des effets CAS. Une autre illustration sur ce même cadre de modélisation est offerte par Britz et Hertel (2011). Ces auteurs examinent les effets CAS et émissions associées de GES liés à la consommation européenne de biodiesel. Ils trouvent avec le cadre GTAP-BIO décrit ci-dessus des émissions (annualisées) de GES ramenées à l'unité d'énergie de 50,2 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. Puis ils modifient les équations d'offre et de rendements en Europe pour intégrer les élasticités, conditionnelles aux surfaces totales, simulées à partir du modèle CAPRI. Leur matrice d'élasticité fournit ainsi directement les élasticités rendements (prix propres et croisées). Par exemple, l'élasticité prix propre des rendements européens en cultures oléagineuses est de 0,69 (contre 0,25 ci-dessus). Avec cette version modifiée, les auteurs trouvent sans surprise que les émissions européennes (et donc les variations de surfaces) sont largement atténuées. Le même choc de consommation européenne de biodiesel conduit à présent à des émissions (annualisées) de GES de l'ordre de 42,2 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. En d'autres termes, les effets émissions de GES sont diminués de 16% lorsque seules les élasticités européennes sont plus précises (pour reprendre le terme de ces auteurs).

#### **2.4. Le cadre MIRAGE-BioF**

Le cadre MIRAGE-BioF découle du cadre MIRAGE, lui-même s'appuyant dans une large mesure sur le cadre GTAP évoqué ci-dessus. Par rapport au cadre MIRAGE, plusieurs modifications ont également été apportées à ce cadre pour permettre une analyse pertinente des politiques de biocarburants. Ces modifications portent encore à la fois sur la base de données (avec l'introduction des co-produits et de nombreux produits agricoles par exemple) et sur les spécifications des fonctions comportementales (avec des structures élaborées de technologies de production par exemple). Ces différentes améliorations sont décrites dans Laborde (2011) ou Laborde et Valin (2012).

La spécification des fonctions d'offre, de surface et de rendements est relativement proche de celle du cadre GTAP-BIO avec une modélisation explicite des décisions d'intrants par les producteurs agricoles. Il existe bien évidemment des différences, comme celle liée à la distinction plus fine des intrants et l'introduction des engrais minéraux (les engrais organiques ne sont pas par contre renseignés car il est à ce jour impossible de les obtenir au niveau mondial). Par rapport au cadre GTAP-BIO, la spécification des technologies agricoles est moins rigide car une fonction CES supplémentaire est introduite entre la terre et les engrais minéraux.<sup>3</sup> Par contre, la substitution en haut de l'arbre de production entre l'agrégat composite de la valeur ajoutée et les autres intrants variables est supposée nulle.

Au niveau des équations d'offre de facteurs de production, il est en revanche supposé une élasticité finie de l'offre de travail non qualifié aux secteurs agricoles (captée par une élasticité de mobilité de ce facteur entre les secteurs agricoles et non agricoles). La terre arable est de nouveau supposée imparfaitement mobile entre les secteurs arables, de même que les mobilités sont imparfaites entre les terres arables, les prairies et les forêts. Au niveau de l'offre totale de terre cultivée (y compris les forêts gérées mais pas les forêts primaires), il est supposé qu'elle augmente lorsque sa rémunération augmente (avec une élasticité prix propre qui décroît avec l'extension de ces surfaces).

Ces généralisations des schémas de substitution et des mobilités des facteurs conduisent à des formules d'élasticités prix propre des productions, surfaces et rendements un peu plus complexe. En effet l'augmentation du prix d'une culture ne se transmet pas intégralement en une augmentation de la rémunération de la terre allouée (comme l'indique l'équation 2 ci-dessus). Cette augmentation est partagée entre cette rémunération de la terre et la rémunération du travail non qualifié (concrètement cela veut dire que les rémunérations des agriculteurs augmentent également lorsque le prix de leurs productions augmente). Les élasticités prix propre des surfaces et rendements sont données par :

$$\varepsilon_{p_q}^l = \frac{\varepsilon_{p_l}^l}{s_l + s_n \left( \frac{\varepsilon_{p_l}^l + \sigma_{lf} \frac{s_f}{s_l + s_f} + \sigma_{ff} \frac{s_l}{s_l + s_f}}{\varepsilon_{p_n}^n + \sigma_{va} \frac{s_k}{s_n + s_k} + \sigma_{ff} \frac{s_n}{s_n + s_k}} \right)} \quad (7)$$

<sup>3</sup> En fait deux spécifications sont testées pour la substitution entre la terre et les engrais : soit une fonction CES, soit une fonction logistique. Laborde (2011) indique que le choix d'une spécification n'a pas de réel impact sur le calcul des CAS. Puisque dans la deuxième section de notre rapport nous utilisons le cadre GTAP-BIO qui lui n'adopte que des CES, les formules et résultats reportés ci-dessous utilisent la version CES.

$$\varepsilon_{pq}^y = -\frac{\sigma_{ff}}{s_l+s_f+s_n+s_k} + \frac{\sigma_{lf}\frac{s_f}{s_l+s_f} + \sigma_{ff}\frac{s_l}{s_l+s_f}}{s_l+s_n \left( \frac{\varepsilon_{p_l}^l + \sigma_{lf}\frac{s_f}{s_l+s_f} + \sigma_{ff}\frac{s_l}{s_l+s_f}}{\varepsilon_{p_n}^n + \sigma_{va}\frac{s_k}{s_n+s_k} + \sigma_{ff}\frac{s_n}{s_n+s_k}} \right)} \quad (8)$$

Avec le même type de notation que précédemment, l'indice n indiquant le travail non qualifié, l'indice f indiquant les fertilisants minéraux, l'indice k indiquant le capital. Les élasticités de substitution sont à présent au nombre de trois : l'élasticité de substitution entre les fertilisants et la terre ( $\sigma_{lf}$ ), l'élasticité de substitution entre le travail non qualifié et l'agrégat composite formé du capital et des produits énergétiques ( $\sigma_{VA}$ ), l'élasticité de substitution entre les agrégats composites obtenus précédemment ( $\sigma_{ff}$ ).

De nouveau, l'élasticité prix propre de l'offre est la somme des élasticités prix de la surface et du rendement. Il peut être assez facilement remarqué qu'il s'agit d'une généralisation des élasticités calculées dans le cadre GTAP-BIO. Considérons d'abord l'élasticité de la surface (équation 7). Si nous supposons que l'élasticité d'offre de travail non qualifié est infini ( $\varepsilon_{p_n}^n = \infty$ ), alors nous obtenons la formule (5). De la même manière, si un secteur agricole ne devait pas utiliser de travail non qualifié, nous obtenons à nouveau la même formule. Ces deux équations (5) et (7) diffèrent uniquement par leurs dénominateurs qui mesurent en fait l'inverse de la part de l'augmentation du prix qui se transmet dans la rémunération unitaire de la terre. Pour faciliter la compréhension, nous exprimons dans l'équation (9) cette augmentation de la rémunération de la terre :

$$p_l = \frac{p_q}{s_l+s_n \left( \frac{\varepsilon_{p_l}^l + \sigma_{lf}\frac{s_f}{s_l+s_f} + \sigma_{ff}\frac{s_l}{s_l+s_f}}{\varepsilon_{p_n}^n + \sigma_{va}\frac{s_k}{s_n+s_k} + \sigma_{ff}\frac{s_n}{s_n+s_k}} \right)} \quad (9)$$

Cette rémunération augmente lorsque la terre devient un facteur rare ( $\varepsilon_{p_l}^l$  tend vers zero). Inversement, l'augmentation de la rémunération de la terre est plus petite lorsque le travail non qualifié devient rare (par conséquent les agriculteurs gardent une plus grande part de l'augmentation du prix pour rémunérer leur travail). L'évolution de la rémunération de la terre consécutive à une augmentation du prix du produit dépend également des possibilités de substitution entre ces facteurs potentiellement rare et les autres intrants (capital, fertilisants en particulier). Ainsi, plus il est facile de substituer ces intrants entre eux, moins la rareté d'un facteur devient contraignante. Par exemple, plus il est facile de substituer des fertilisants ou d'autres facteurs (capital, travail) à de la terre, moins la rareté de la terre a d'influence sur l'évolution de son prix (voir le numérateur de la parenthèse).

Considérons à présent l'élasticité rendement (équation 8). Il peut être assez facilement remarqué à nouveau que l'équation (6) est un cas particulier de cette nouvelle équation où les élasticités de substitution sont toutes de la même valeur, où la part des fertilisants est supposée nulle (car le cadre GTAP-BIO ne distingue pas ces fertilisants parmi les différents autres inputs). Ce qui est plus important à souligner est que cette élasticité rendement dépend encore fondamentalement des élasticités de substitution (elles apparaissent toutes au numérateur). Si ces élasticités de substitution sont faibles (à la limite nulle), alors l'élasticité rendement est faible (à la limite nulle). La contribution de l'élasticité rendement à l'élasticité de production est directement dépendante de ces élasticités de substitution : plus elles sont faibles, plus la contribution des effets rendements dans les effets production est faible.

Le tableau 2 ci-dessous offre une estimation de ces élasticités pour les graines oléagineuses dans le cadre MIRAGE-BioF. Pour effectuer cette estimation, nous formulons tout d'abord plusieurs hypothèses quant aux valeurs des dépenses dans chaque intrant (travail, capital, terre, fertilisants, produits énergétiques). En effet nous ne disposons pas de la base complète de données du cadre MIRAGE-BioF, ni de sa situation projetée à l'horizon 2020. Cette base de données s'appuie toutefois sur les données initiales de GTAP avec, par exemple, une distinction des différentes graines oléagineuses respectant les valeurs de l'agrégat graines oléagineuses. Concrètement nous avons utilisé les valeurs des rémunérations des facteurs de production et les valeurs de production de la base de données GTAP-BIO pour 2001. Nous avons supposé que les dépenses en produits fertilisants et énergétiques représentaient chacune 7,5% du coût total de production (le solde étant pour les autres intrants variables). Les résultats sont très peu sensibles à ces parts. Ils le sont évidemment davantage aux élasticités. Pour les élasticités de substitution, nous avons pris les valeurs moyennes indiquées par Laborde (2011) : 0,11 pour l'élasticité de substitution entre la terre et les engrais pour les pays développés et 0,20 pour les pays en développement, 1,1 pour l'élasticité de substitution entre le travail non qualifié et l'agrégat comprenant le capital, enfin 0,07 pour l'élasticité de

substitution entre les différents agrégats.<sup>4</sup> Pour les élasticités d'offre de terre à la culture d'oléagineux, nous avons supposé des valeurs de 0,3 (soit l'élasticité de mobilité de la terre entre les cultures arables). Enfin l'élasticité de l'offre de travail non qualifié à la culture d'oléagineux est égale au rapport entre l'élasticité de transformation du travail non qualifié (soit 0,5) et la part de la rémunération du travail pour la culture d'oléagineux dans la rémunération du travail agricole non qualifié (nous comprenons en effet que le travail non qualifié est mobile entre les secteurs agricoles).

De nouveau ce tableau fournit les résultats pour les principaux pays (disponibles dans la base de données GTAP-BIO et qui ne correspondent pas tout à fait à la couverture géographique retenu dans le cadre MIRAGE-BioF), une estimation par pondération au niveau mondial des élasticités par zone et la contribution des élasticités rendement aux élasticités d'offre.

**Tableau 2 : Estimation des élasticités prix propres des offres, des surfaces et des rendements des cultures oléagineuses dans le cadre MIRAGE-BIOF**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Offre	1,76	4,02	4,04	1,44	0,96	0,84	2,18
Surface	1,45	3,18	2,93	1,15	0,80	0,71	1,75
Rendements	0,30	0,84	1,13	0,29	0,17	0,13	0,43
Contribution rendements (%)	17,26	20,87	27,95	20,29	17,35	15,60	19,92

Nous obtenons de nouveau une relative faible contribution des élasticités rendements aux élasticités d'offre. Par exemple, ces élasticités impliquent que l'augmentation de 1% du prix européen des graines oléagineuses entraîne, toutes choses égales par ailleurs, une augmentation des surfaces consacrées de 3,18% et des rendements de 0,84%. La contribution est donc à peine supérieure à 20%. Elle est du même niveau au niveau mondial.

<sup>4</sup> Très exactement la valeur de l'élasticité de substitution entre le travail et l'agrégat comprenant le capital provient du fichier excel qui accompagne la publication et disponible auprès de la CE. Dans ce fichier, nous retrouvons bien la valeur de l'élasticité de substitution entre les facteurs (0,07). Par contre, nous ne retrouvons pas la valeur de l'élasticité de substitution entre la terre et les engrais. Sa moyenne dans ce fichier sur l'ensemble des régions et cultures est de 0,06 (il n'est pas renseigné de valeurs pour la culture de palme, ce qui pourrait expliquer cette divergence). Les valeurs des élasticités de substitution sont calibrées à partir des valeurs synthétiques de Rosegrant et al. (2008).

Ces effets rendements sont tout de même largement supérieurs à ceux calculés précédemment avec le cadre GTAP-BIO, tout simplement parce que les élasticités de substitution sont ici supérieures (voir les élasticités de substitution du tableau 1). Cette contribution des effets rendements au niveau du calibrage reste cependant inférieure aux évolutions ces dernières années pour les graines oléagineuses (ce résultat se généralise aux autres cultures arables). Elle est aussi fortement différente des évolutions projetées à l'horizon 2020 des rendements et des surfaces mondiales en grandes cultures que Laborde (2011) utilise pour définir sa situation de référence (pour rappel, l'augmentation de la production serait expliquée à hauteur de 64% par une augmentation des rendements et 36% par les surfaces). En d'autres termes, cet auteur comme les autres suppose des augmentations conséquentes de rendement pour la projection et calibre de faibles effets rendement pour l'analyse de la politique européenne de biocarburants.

Laborde (2011) conduit plusieurs simulations pour expliquer les résultats CAS induits par la politique européenne de biocarburants. Ces simulations montrent en particulier qu'une consommation supplémentaire de biodiesel conduit à un CAS mondial variant entre 0,08 et 0,21 ha/tep selon les huiles considérées. Cela est moins fort si l'huile de palme est utilisée (mais les sols convertis sont plus riches en carbone), intermédiaire avec les huiles de colza et de soja (0,16) et élevé avec l'huile de tournesol. Il apparaît donc que le résultat est assez proche de celui obtenu avec le cadre précédent GTAP-BIO lorsque l'huile de palme est privilégiée (autour de 0,08 ha/tep). Ces résultats sont plus faibles pour les autres huiles (autour de 0,2 contre 0,38 ha/tep), ce qui pourrait s'expliquer par un calibrage des effets rendements plus élevés.

Laborde (2011) décompose également ses effets production entre des effets surfaces et des effets rendements lors de la simulation de la politique européenne de biocarburants dans sa globalité. Il trouve que pour toutes les cultures, les effets surfaces dominent les effets rendements. Pour les cultures oléagineuses, la progression des productions s'explique à plus de 80% par l'augmentation des surfaces, ce qui paraît cohérent avec nos calculs précédents des différentes élasticités. La contribution des effets surfaces est plus faible pour la culture de blé (66%) du fait d'un déplacement de cette culture vers des zones à faibles rendements initiaux.

Comme de nombreux auteurs, Laborde (2011) reconnaît les incertitudes sur de nombreux paramètres du modèle MIRAGE-BioF et conduit donc des tests de sensibilité. Malheureusement pour notre analyse, ces tests combinent simultanément plusieurs paramètres

affectant tant les cotés offre et demande de son modèle. Il n'est donc pas possible d'identifier si les résultats CAS (et émissions associées de GES) sont très ou peu sensibles au calibrage des effets rendements. Nous notons tout de même que les valeurs maximales des élasticités de substitutions représentent près du triple des valeurs moyennes (tandis que les valeurs minimales sont proches de zéro, impliquant aucun effet rendement au niveau du calibrage, voir équation 8). Ainsi, pour les pays développés, la valeur maximale de l'élasticité de substitution entre la terre et les autres facteurs de production est de 0,18 (contre une valeur moyenne de 0,07) et la valeur maximale de l'élasticité de substitution entre la terre et les fertilisants minéraux de 0,29 (contre une valeur moyenne de 0,11). Pour autant la contribution des élasticités rendements dans les élasticités d'offre ne triple pas car ces élasticités de substitution apparaissent également dans l'élasticité des surfaces (voir équation 7). Au niveau mondial, elle atteint 45% (contre 20% dans le cas moyen).

Nous soulignons également que, même si le domaine de variation peut paraître large avec un triplement des valeurs, ces valeurs maximales des élasticités de substitution sont inférieures aux valeurs moyennes issues des synthèses effectuées pour l'OCDE. Abler (2001) pour les Etats-Unis, le Canada et le Mexique, Salhofer (2001) pour les pays européens ont conduit une revue de littérature sur les estimations économétriques de ces élasticités de substitution. Pour les Etats-Unis, Abler (2001) trouve que la valeur moyenne de l'élasticité de substitution entre la terre et les autres facteurs de production est de 0,3 et l'écart type de 0,8. La valeur moyenne de l'élasticité de substitution entre la terre et les intrants variables (engrais, produits phytosanitaires, ..) est de 0,5 et l'écart type de 1,5. Pour l'Europe, Salhofer (2001) trouve que la valeur moyenne de l'élasticité de substitution entre la terre et les autres facteurs de production est également de 0,3 et l'écart type de l'ordre de 1. La valeur moyenne de l'élasticité de substitution entre la terre et les intrants variables est de 1,7 et l'écart type de 1,1.

Par conséquent, les valeurs maximales des élasticités de substitution retenues dans les tests de sensibilité avec le cadre MIRAGE-BioF sont inférieures aux valeurs moyennes des études économétriques portant sur les pays développés. Par ailleurs, elles impliquent toujours ex ante (pour des changements marginaux) des effets rendements, relativement aux effets productions, inférieurs aux évolutions projetées de ces rendements et productions.



## 2.5. Synthèse

Cette revue de littérature centrée sur les effets rendements de 4 cadres de modélisation mobilisés pour analyser les effets CAS du biodiesel européen nous fournit trois enseignements principaux. Premièrement, les différentes évaluations du CAS induit par la consommation européenne de biodiesel aboutissent toutes à des augmentations de production de cultures essentiellement grâce à l'augmentation de surfaces cultivées et au mieux modestement par une augmentation des rendements sur les surfaces cultivées. Ces résultats sont fortement différents des évolutions observées sur longue période ou des projections de moyen terme où l'essentiel de la production supplémentaire est obtenu par une augmentation des rendements. Deuxièmement, ce relatif consensus n'apparaît guère surprenant car, selon les informations disponibles, les calibrages des paramètres des modèles sous-jacents reposent sur des élasticité rendements nettement plus faibles que les élasticité de surface. Troisièmement, les résultats CAS de ces modèles sont par ailleurs fortement sensibles aux hypothèses de calibrage des effets rendements, quand le calibrage de ces derniers varie effectivement significativement. A notre connaissance, ces tests de sensibilité n'ont pas directement porté sur la consommation européenne de biodiesel, ce qui fait l'objet de la prochaine section.

## 3 Le biodiesel européen et les évolutions de rendements : analyse de sensibilité

Les résultats CAS issus des modélisations économiques ont été largement débattus dans différentes instances. Il y est admis qualitativement que les évolutions de rendements peuvent avoir un impact mais les évaluations quantitatives ont été jugées pertinentes et cohérentes. Par exemple, dans leur analyse des résultats issus de GTAP-BIO, Edwards *et al.* (2010) affirment que de forts effets rendements ne peuvent s'observer qu'à moyen/long terme et qu'à court terme, les effets induits des prix sur les rendements sont faibles. Nous partageons ce point de vue sur le court terme. En revanche, il est toujours délicat de définir ce que l'on entend par moyen/long terme. Les politiques (américaine et européenne) de biocarburants ne peuvent pas vraiment être considérées comme des politiques de très court terme. Les objectifs sont annoncés sur plusieurs années et de plus, mis en œuvre progressivement, laissant ainsi le temps aux acteurs de s'ajuster et d'optimiser leurs plans de production. Par conséquent, il nous paraît parfaitement légitime de tester les résultats à une modification plus importante des

techniques de production agricole qui pourraient conduire à une augmentation des rendements.

La méthodologie retenue dans ce papier consiste à utiliser le cadre GTAP-BIO pour deux raisons principales. D'une part, il est publiquement disponible, les résultats reportés ci-dessous pouvant être répliqués par tous. D'autre part, le cadre de l'équilibre général est nettement plus rigoureux et n'aboutit pas à des incohérences potentielles comme l'ont identifié Blanco Fonseca *et al.* (2010) avec le cadre AGLINK-COSIMO. Pour autant, ce cadre n'est pas la panacée et a fait l'objet de critiques de modélisateurs. Par exemple, Babcock et Carriquiry (2010) questionnent *i/* la non prise en compte des possibilités de double culture aux Etats-Unis et au Brésil, *ii/* la non prise en compte des terres en jachère dans de nombreuses régions du monde (terres ayant selon ces auteurs un faible stock de carbone), *iii/* la modélisation de l'imparfaite mobilité de la terre qui implique que l'expansion des surfaces arables entraîne trop de forêts converties et pas assez de prairies (ces dernières étant moins riches en carbone), ainsi que *iv/* l'hypothèse *ad hoc* d'une productivité moindre des nouvelles terres mises en culture. Pour ces auteurs, toutes ces limites de modélisation biaisent à la hausse les résultats issus du cadre GTAP-BIO. L'utilisation de la base de données Wood Hole pour les stocks de carbone, plutôt que la base Winrock est également susceptible de biaiser à la hausse ces résultats (Broch *et al.* 2013).

Dans notre papier, nous ne cherchons pas à vérifier/intégrer ces remarques et portons notre effort sur l'effet du calibrage des élasticités rendements sur la mesure des effets CAS. Il est fondamental de comprendre que nous n'introduisons pas dans notre analyse de sensibilité des chocs technologiques exogènes qui conduiraient à une augmentation artificielle/inexpliquée des rendements. Nous nous contentons simplement de revoir le calibrage des élasticités de substitution qui gouvernent la manière dont les producteurs agricoles définissent leurs systèmes de production au sein d'une frontière de production donnée. Ci-dessous nous justifions d'abord nos choix de calibrage, puis reportons les résultats de simulation. Nous finissons par une analyse de sensibilité à la taille du choc simulé et à l'horizon de simulation.

### **3.1. Le calibrage alternatif des élasticités**

Pour bien comprendre les résultats de notre analyse de sensibilité, nous établissons tout d'abord des résultats de référence avec le calibrage GTAP-BIO des différentes élasticités de substitution et de mobilité des facteurs (terre) entre secteurs (voir la sous section 2.c.). Pour

rappel, les hypothèses de calibrage impliquent qu'*ex ante* les élasticités rendement sont très faibles par rapport aux élasticités surfaces, essentiellement parce que les élasticités de substitution entre les intrants sont faibles (moins de 0,1, voir le tableau 1).

Nous envisageons alors un calibrage alternatif de ces élasticités de substitution qui conduit à une contribution plus importante des élasticités rendement dans les élasticités d'offre. Etant donnée leur importance cruciale, nous justifions les valeurs que nous retenons. Nous avons vu précédemment que les valeurs retenues tant dans le cadre GTAP-BIO que le cadre MIRAGE-BioF sont faibles par rapport aux estimations économétriques synthétisées dans l'étude OCDE (Salhofer, 2001). Aussi dans ce calibrage alternatif, nous nous appuyons sur les valeurs moyennes qui y sont reportées. Plus précisément, nous supposons que les élasticités de substitution restent identiques aux deux fonctions CES spécifiées dans le cadre GTAP-BIO. Nous retenons les plus faibles valeurs moyennes reportées dans l'étude OCDE (soit les élasticités de substitution entre la terre et les autres facteurs de production, pas celle entre la terre et les intrants variables). De plus, comme les résultats sont très proches entre les Etats-Unis et l'Europe, nous supposons une même valeur de 0,3 à toutes les régions. Les implications en termes d'élasticités rendements, surfaces et offres sont données dans le tableau 3. Ce tableau est exactement construit comme le tableau 1.

**Tableau 3 : Elasticités alternatives de substitution, élasticités alternatives des offres, des surfaces et des rendements des cultures oléagineuses dans le cadre GTAP-BIO**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Substitution	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Offre	3,43	8,63	6,96	2,75	1,69	1,55	4,20
Surface	2,20	5,48	4,08	1,87	1,16	1,13	2,79
Rendements	01,23	3,15	2,88	0,88	0,54	0,42	1,41
Contribution rendements (%)	35,91	36,49	41,42	31,89	17,79	27,15	33,59

Les élasticités surfaces sont identiques à celles du tableau 1 car à long terme elles ne dépendent pas des élasticités de substitution (voir équation 5). Par contre, les élasticités de rendement augmentent, très fortement en Europe pour atteindre 3,15. Nous sommes bien conscients que cela peut paraître de manière isolée très fort. Mais comme le soulignent aussi Edwards *et al.* (2010), le plus important est le ratio entre ces élasticités rendement et les élasticités surface. Nous obtenons qu'au point de calibrage, la contribution de l'élasticité rendement atteint 36% de l'élasticité offre en Europe. Le chiffre est similaire aux Etats-Unis.

Les changements sont moins spectaculaires pour l'Inde ou la zone Asie du Sud Est (qui comprend l'Indonésie et la Malaisie) car l'élasticité de substitution initiale est plus proche de 0,3. Au niveau mondial, la contribution des effets rendements est de 33,6%.

Notre calibrage alternatif s'appuie donc sur une synthèse des élasticités de substitution effectuée en 2001, qui ne couvre naturellement pas les données et estimations de la dernière décennie. A notre connaissance, il y a eu très peu de travaux économétriques ces dernières années qui estiment simultanément les élasticités de rendement et de surface.

Il y a tout d'abord le travail de Huang et Khanna (2010) portant sur les Etats-Unis et les cultures de soja, maïs et blé. Toutefois les spécifications estimées des équations de surface et rendements sont de forme réduite. Par conséquent, les contraintes structurelles (sur la convexité des fonctions de profit ou les conditions de symétrie) ne sont pas imposées, ce qui limite l'apport de ces estimations pour notre calibrage de paramètres. Notons tout de même que ces auteurs trouvent que les élasticités prix propre des rendements de ces cultures sont respectivement de 0,06, 0,15 et 0,43. Les élasticités prix propre des surfaces correspondantes sont respectivement de 0,55, 0,66 et 0,50. Sous l'hypothèse grossière d'absence d'élasticités croisées au niveau des surfaces, alors les contributions (biaisées à la baisse) des élasticités de rendement dans les élasticités d'offre s'élèvent à respectivement 11%, 23% et 86%. De manière toute aussi grossière (simple somme pondérée par la part des surfaces), la contribution de l'élasticité rendement à l'élasticité d'offre pour l'ensemble de ces trois cultures s'élève à 33%.

Ensuite Carpentier et Letort (2012), dans une étude empirique sur la France, cherchent à allouer les intrants variables entre trois cultures (le blé, l'orge et le colza). Une approche structurelle est adoptée avec une décision en deux temps des producteurs au cours d'une campagne : les allocations de surface dans un premier temps, puis les applications d'intrants variables au cours de la campagne. Les estimations économétriques respectent les conditions d'homogénéité, de symétrie et de concavité de la fonction de coût. Cependant ces auteurs considèrent des horizons de court terme où les surfaces totales allouées à ces trois cultures sont exogènes. Par définition donc, les élasticités d'offre au niveau agrégé sont données par les élasticités rendements. Ces dernières varient entre 0,09 et 0,21, soit une moyenne de l'ordre de 0,15. Cependant, au niveau de chaque culture, ces auteurs calculent les élasticités surfaces et rendements. Si nous faisons la même approximation d'absence d'effets croisés au niveau de surfaces, alors les contributions des élasticités rendement aux élasticités d'offre sont de 25% pour le blé, 31% pour l'orge et 77% pour le colza. Toujours sur les mêmes hypothèses

grossières, cela conduit de nouveau à une élasticité rendement contribuant à plus du tiers à l'élasticité d'offre au niveau global.

Sans fournir directement les élasticités nécessaires pour le cadre GTAP-BIO, ces deux récentes études économétriques indiquent que notre calibrage alternatif conduit à des rapports d'élasticités rendement/surface qui restent crédibles.

### **3.2. Résultats**

Nous simulons un choc de consommation de biodiesel d'un million de tep. La situation de départ étant l'année 2001, cela représente un doublement de cette consommation. Nous examinerons plus tard les effets d'un choc plus important, les résultats n'étant pas toujours parfaitement linéaires.

Nous débutons l'analyse avec les paramètres standards du cadre GTAP-BIO (Tableau 1). Les résultats sur les marchés des graines oléagineuses, sur les marchés des cultures arables<sup>5</sup>, sur les surfaces de forêt et prairies converties sont fournis dans les tableaux 4 à 6.

Sans surprise, nous obtenons une augmentation des productions de graines oléagineuses dans toutes les zones. L'effet est le plus fort en Europe et atteint 1,33%. En termes relatifs, les augmentations les plus importantes sont ensuite au Brésil et aux Etats-Unis. La production mondiale de graines augmente de 0,29%. Les prix augmentent de 0,13%, ce qui conduit à une élasticité ex post de 2,23 (finalement pas très loin de la valeur de calibrage). Nous trouvons que dans chaque zone, la majorité de la production supplémentaire est obtenue par une augmentation des surfaces. Par exemple, elle atteint 1,22% en Europe et explique 8% de l'augmentation de la production. Elle est plus forte en Asie du Sud Est par exemple car l'élasticité de substitution est plus forte. Au niveau mondial, nous trouvons que l'augmentation de la production s'explique ex post à hauteur de 26% par une augmentation du

---

<sup>5</sup> Les cultures arables sont définies comme la simple somme des marchés de graines oléagineuses, des céréales et des cultures sucrières. Nous n'incluons pas ici les marchés des autres produits végétaux (tels que les fruits et légumes) qui ne sont distingués dans les cadres d'équilibre partiel susmentionnés. Les surfaces allouées à ces cultures sont évidemment prises en compte dans les surfaces totales. Notons que même s'il est supposé une imparfaite mobilité des terres entre les activités, la sommation des surfaces est possible car le cadre GTAP-BIO corrige les écarts entre les hectares dits effectifs et les hectares récoltés (voir Golub et Hertel, 2012). La sommation sur les productions est un indice pondéré par les prix initiaux. Ces définitions sont évidemment communes aux différents résultats présentés ci-dessous et par ailleurs similaires à Edwards et al. (2010).

rendement. Cette proportion est très différente de la valeur calibrée (5%) parce qu'il y a un relatif déplacement de la production de graines oléagineuses vers des zones à fort rendements initiaux (Europe, Brésil, Etats-Unis). En effet, les prix de ces graines augmentent plus dans ces zones par rapport aux autres sous l'effet de la modélisation « Armington » des échanges (la proportion de 5% calculée dans la première section est obtenue sous l'hypothèse que tous les pays enregistrent une même augmentation de 1% de leur prix). Ce résultat n'est en rien nouveau et est commun à tous les résultats analysés dans notre revue de littérature.

**Tableau 4 : Impacts sur les offres, surfaces, rendements et prix des graines oléagineuses du choc de consommation de biodiesel en Europe d'un million de tep (en %)**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Offre	0,21	1,33	0,45	0,09	0,02	0,10	0,29
Surface	0,15	1,22	0,40	0,06	0,02	0,06	0,22
Rendements	0,06	0,11	0,05	0,03	0,00	0,04	0,08
Prix	0,14	0,35	0,20	0,06	0,04	0,13	0,13
Contribution rendements (%)	29,81	7,91	11,36	29,37	16,73	35,93	26,05

L'augmentation des productions de graines oléagineuses et des surfaces correspondantes conduit à une légère baisse des surfaces allouées aux autres grandes cultures (céréales et cultures céréalières). Des augmentations modestes de rendement sont alors observées. Pour ces autres cultures, la contribution des effets rendements dépasse alors les 100%. Les effets sont néanmoins très modestes et dépassent juste une fois les 0,1% (recul des surfaces européennes de céréales secondaires). Ceci implique qu'au niveau du total des cultures arables et au niveau mondial, les résultats sur les graines oléagineuses dominent. L'augmentation de la production de grandes cultures atteint 0,05%, les surfaces arables augmentent de 0,04% et les rendements de 0,01%. Ces derniers contribuent donc à 25% de l'augmentation de la production. Cela n'empêche pas qu'au niveau de chaque zone, ces contributions rendements peuvent être très différentes car il y a un déplacement relatif de la proportion de chaque culture dans les surfaces arables.

**Tableau 5 : Impacts sur les offres, surfaces, rendements et prix des cultures arables du choc de consommation de biodiesel en Europe d'un million de tep (en %)**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Offre	0,07	0,18	0,18	0,02	0,01	0,01	0,05
Surface	0,02	0,12	0,12	0,02	0,00	0,03	0,04
Rendements	0,05	0,06	0,07	-0,01	0,01	-0,02	0,01
Contribution rendements (%)	73,92	31,06	36,32	-30,78	62,77	-112,17	24,93

Ce choc de consommation européenne de biodiesel entraîne donc une augmentation des surfaces arables qui atteint 71 milliers d'hectares en Europe et 206 milliers d'hectares au niveau mondial. En d'autres termes, nous obtenons un effet CAS de 0,21 ha/tep. Cet effet est intermédiaire à celui reporté dans Edwards *et al.* (2010) (entre 0,08 et 0,38) car nous ne pénalisons ou privilégions pas une huile plus qu'une autre pour la production de biodiesel.

En Europe, ces suppléments de surfaces arables proviennent majoritairement de la conversion de forêt, plus modestement du retournement des prairies. Nous mentionnons au passage que les critères de durabilité ne sont évidemment pas pris en compte dans ces calculs, ce qui n'est pas l'objet de cette analyse. Il s'avère que la réduction mondiale des hectares en forêt est proche de la réduction européenne (50 milliers d'ha). La réduction mondiale des surfaces en prairies atteint 153 milliers d'hectares, réduction partagée entre l'Europe, le Brésil et l'Afrique Sub-Saharienne.

**Tableau 6 : Impacts sur les surfaces globales d'un choc de consommation de biodiesel en Europe d'un million de tep (en milliers d'hectares)**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Surfaces arables	12,10	71,38	33,22	0,42	3,70	-0,12	205,94
Prairies	-13,28	-20,21	-20,70	-7,17	-1,23	-0,58	-153,04
Forêts	1,25	-51,14	-12,51	6,81	-2,49	0,70	-52,75

Finalement le cadre GTAP-BIO offre une estimation des tonnes de CO<sub>2</sub>eq qui sont déstockées à la suite des effets CAS. L'estimation est de 37,37 millions de tonnes au niveau mondial. 49% de ces émissions proviennent du CAS en Europe. Si l'on annualise ces émissions par 20 ans, alors nous trouvons des émissions associées au CAS de 49,4 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. Sans surprise, ces chiffres sont très proches de ceux reportés dans Britz et Hertel (2011).

Nos résultats mondiaux sont également assez proches de Laborde (2011) qui servent à justifier les propositions de révision des directives européennes. Les rendements contribuent modestement aux augmentations des productions mondiales (de l'ordre de 20% contre 26% ici) et les émissions associées aux CAS sont importantes (de l'ordre de 54 gCO<sub>2</sub>eq/MJ contre 49 ici). Les impacts par pays sont par contre plus contrastés, sans doute liés aux implications de la modélisation Armington des échanges (voir Golub et Hertel, 2012). Sans constituer une preuve formelle de l'équivalence de deux cadres de modélisation, nous avons réduit de manière grossière de 20% toutes les élasticités de substitution dans le cadre GTAP-BIO (car le cadre MIRAGE-BioF interdit les substitutions entre les facteurs de la valeur ajoutée composite et les autres intrants variables). Dans cette variante, la contribution des rendements à l'augmentation des productions est de 21% et les émissions associées aux CAS s'élèvent à 53,3 gCO<sub>2</sub>eq/MJ.

Examinons à présent ces mêmes résultats lorsque les élasticités de substitution au sein des technologies de production des cultures arables sont fixées à 0,3 (Tableau 3). Les mêmes résultats sont reportés dans les tableaux 7 à 9.

**Tableau 7 : Impacts sur les offres, surfaces, rendements et prix des graines oléagineuses du choc de consommation de biodiesel en Europe d'un million de tep (en %) : calibrage alternatif**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Offre	0,21	1,46	0,50	0,06	0,02	0,08	0,30
Surface	0,10	0,85	0,25	0,04	0,01	0,05	0,14
Rendements	0,11	0,61	0,25	0,02	0,01	0,03	0,16
Prix	0,07	0,19	0,09	0,03	0,02	0,07	0,06
Contribution rendements (%)	51,28	41,71	50,08	37,68	36,81	38,14	53,16

Comme nous avons juste changé la valeur de certains paramètres, la nature de ces nouveaux résultats est évidemment identique à ceux que nous venons de décrire. Aussi nous analysons surtout les différences entre ces résultats.

Le même choc de consommation européenne de biocarburants conduit pratiquement aux mêmes effets productions. La production mondiale de graines oléagineuses augmente désormais de 0,30% (contre 0,29%). Cela vient du fait que les effets prix sont plus faibles (augmentation du prix mondial de 0,06% contre 0,13%) et donc que les consommations alimentaires d'huiles et tourteaux diminuent légèrement moins. L'augmentation moindre des



prix s'explique simplement par des offres plus élastiques aux prix. Sans surprise nous observons à présent des effets rendements plus importants et par conséquent des effets surfaces plus faibles. Par exemple, les surfaces européennes augmentent à présent de 0,85% (contre 1,22% précédemment) et les rendements de 0,61% (contre 0,11% précédemment). La contribution des effets rendements dans les effets offres atteint 42% au niveau européen. Elle est supérieure au niveau mondial (53%) toujours liée au déplacement relatif de cette production entre les zones. Nous pouvons aussi remarquer que les changements les plus notables concernent logiquement les zones où les élasticités de substitution ont le plus augmenté : Europe et Brésil. Ces changements sont mineurs en Asie du Sud Est par exemple.

**Tableau 8 : Impacts sur les offres, surfaces, rendements et prix des cultures arables du choc de consommation de biodiesel en Europe d'un million de tep (en %) : calibrage alternatif**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Offre	0,07	0,20	0,21	0,01	0,01	0,01	0,05
Surface	0,01	0,07	0,06	0,01	0,00	0,03	0,02
Rendements	0,06	0,13	0,15	0,00	0,01	-0,01	0,03
Contribution rendements (%)	83,91	62,94	72,51	2,62	70,04	-115,19	63,09

De nouveau, les effets sur les autres marchés de grandes cultures sont modestes (ne dépassent les 0,1%). Aussi au niveau de l'ensemble des grandes cultures (céréales, graines oléagineuses et cultures sucrières), les impacts oléagineux dominent. Par exemple, la production européenne augmente de 0,20% avec une contribution rendement de 63%. Au niveau mondial, nous avons exactement la même contribution, les productions augmentant toujours dans les zones à hauts rendements initiaux. Une telle contribution correspond globalement aux évolutions observées sur longue période et aux projections disponibles avec les cadres FAPRI et AGLINK-COSIMO et adoptées pour définir la situation de référence dans Laborde (2011).

**Tableau 9 : Impacts sur les surfaces globales du choc de consommation de biodiesel en Europe d'un million de tep (en milliers d'hectares) : calibrage alternatif**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
Surfaces arables	2,74	20,28	9,77	-0,08	0,99	0,17	44,23
Prairies	-3,81	-4,50	-5,33	-1,70	-0,27	-0,16	-33,17
Forêts	1,09	-15,81	-4,45	1,79	-0,72	-0,02	-11,03

Les surfaces arables augmentent à présent de 44 milliers d'ha, soit un effet CAS de 0,04 ha/tep. L'augmentation des surfaces arables a toujours lieu essentiellement en Europe (20 contre 71 milliers d'hectares), suivie par le Brésil (10 contre 33 milliers d'hectares). Les surfaces en Afrique Sub-Saharienne n'augmentent pratiquement plus (3 contre 27 milliers d'hectares). Il importe de comprendre que c'est essentiellement parce que les rendements ont augmenté en Europe et au Brésil et très modestement par une augmentation des rendements dans cette zone. Ces surfaces supplémentaires sont toujours majoritairement issues de la conversion de prairies (33 contre 153 milliers d'hectares), suivie par une conversion moindre de forêts (11 contre 52 milliers d'hectares).

Les effets CAS sont donc divisés par environ 5. En toute logique, les émissions sont également divisées par près de 5. Annualisées, elles atteignent à présent 10,4 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. Pour rappel, Dumortier *et al* (2011) avec le cadre FAPRI ont également trouvé de forts impacts des effets rendements qui conduisent à des baisses de 87% de leurs estimations d'émissions dans le cas du bioéthanol américain. Blanco Fonseca *et al* (2010) trouvent avec le cadre AGLINK COSIMO des baisses de 96% des effets CAS. Britz et Hertel (2011) trouve une baisse de 16% des émissions induites lorsque les élasticités européennes sont révisées. Nous trouvons une baisse de l'ordre de 80% des effets CAS et émissions associées dans le cas du biodiesel européen avec un calibrage cohérent des élasticités de substitution dans toutes les zones dans le cadre GTAP-BIO.

La CE ne retient aucun de ces trois cadres de modélisation pour justifier ses propositions de révision des directives européennes sur les biocarburants. Toutefois il nous serait très étonnant (mais sûrement instructif) qu'une telle analyse de sensibilité n'aboutisse pas aux mêmes types de résultats avec le cadre MIRAGE-BioF.

### **3.3. Analyse de sensibilité**

Les résultats précédents montrent la forte sensibilité des estimations au calibrage des élasticités de substitution et donc de rendements. Nous cherchons à présent à voir si cette forte sensibilité est robuste d'une part à la taille du choc, d'autre part à l'horizon de simulation.

Examinons tout d'abord la sensibilité de nos résultats à un choc de consommation européenne de biodiesel plus grand. Le cadre GTAP-BIO est plutôt pertinent pour le long terme car les facteurs de production sont supposés mobiles entre les secteurs. Or à long terme, le choc induit par la consommation européenne n'est pas marginal. Les résultats obtenus dans la

littérature montre que les effets sont plutôt linéaires (Edwards *et al.*, 2010) mais pas complètement (voir par exemple Laborde, 2011). C'est pourquoi nous simulons un choc de 10 millions de tep. Il ne s'agit pas d'une estimation précise de l'augmentation de la consommation mais celle-ci se rapproche de celle simulée par exemple par Laborde (2011). Nous fournissons ci-dessous les tableaux de résultats sur les marchés des graines oléagineuses et sur les surfaces globales avec les deux jeux de paramètres.

**Tableau 10 : Impacts sur les offres, surfaces, rendements et prix des graines oléagineuses du choc de consommation de biodiesel en Europe de 10 millions tep (en %)**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
<i>Calibrage GTAP-BIO</i>							
Offre	2,61	14,59	4,81	1,07	0,40	2,21	3,44
Surface	1,82	13,50	4,24	0,79	0,28	1,45	2,61
Rendements	0,79	1,09	0,57	0,28	0,12	0,76	0,83
Prix	1,77	4,57	2,34	0,76	0,61	2,55	1,66
Contribution rendements (%)	30,35	7,45	11,84	26,56	29,48	34,30	24,18
<i>Calibrage alternatif</i>							
Offre	2,49	16,77	5,21	0,73	0,34	1,93	3,57
Surface	1,22	9,53	2,57	0,43	0,21	1,18	1,70
Rendements	1,27	7,24	2,64	0,30	0,13	0,75	1,87
Prix	0,80	2,24	1,00	0,31	0,29	1,71	0,78
Contribution rendements (%)	50,91	43,19	50,68	41,21	37,92	38,82	52,45

Ce choc conduit évidemment à des effets plus importants. Par exemple, le prix mondial des graines oléagineuses augmente de 1,66% (contre 0,13% dans le scénario précédent) lorsque le calibrage standard GTAP-BIO est adopté. Les effets apparaissent légèrement non linéaires. Ce qui nous paraît plus intéressant est l'évolution de la contribution des rendements. Au niveau mondial et avec le calibrage standard, cette contribution atteint 24,2% (contre 26,1% dans le scénario précédent). Ceci vient du fait que ce choc conduit à une relative plus forte augmentation des productions oléagineuses en Inde et en Afrique Sub-Saharienne où les rendements initiaux sont plus faibles. Lorsque nous adoptons notre calibrage alternatif, cette contribution au niveau mondial est plus stable (52,5% contre 53,2%). Ces différences peuvent paraître modestes mais en termes de surfaces déplacées, cela n'est plus si anodin. En effet, avec le calibrage standard, les surfaces arables augmentent de 2501 milliers d'hectares avec une diminution des surfaces en forêt de 553 milliers d'hectares (soit 22% de l'expansion des surfaces arables). Avec notre calibrage alternatif, les surfaces arables augmentent de 550 milliers d'hectares avec une diminution des forêts de 76 milliers d'hectares (soit 13% de

l'expansion des surfaces arables). Les émissions annualisées associées de GES s'élèvent à 56,5 gCO<sub>2</sub>eq/MJ avec le calibrage standard et 10,0 gCO<sub>2</sub>eq/MJ avec le calibrage alternatif. L'effet des hypothèses sur les rendements est donc plus fort. L'intuition économique est la suivante : plus les possibilités d'accroissement des rendements sont limitées (calibrage standard), plus il faut de surfaces supplémentaires lorsque la taille du choc augmente. Par suite, il y a plus d'émissions associées de GES. En revanche, lorsque les possibilités d'augmentation des rendements sont possibles par substitution des intrants (notre calibrage alternatif), alors il ne faut pas proportionnellement plus de surfaces lorsque la taille du choc augmente. La substitution s'opère avec les intrants relativement disponibles.

Cette simulation conduit à des différences notables dans les rendements : augmentation du rendement oléagineux européen de 1,09% avec le calibrage GTAP-BIO, de 7,24% avec notre calibrage alternatif. Ceci n'est possible qu'avec des évolutions contrastées de l'utilisation des autres intrants (produits chimiques, énergétiques, travail, capital). En fait, dans chaque calibrage, tous ces intrants évoluent dans les mêmes proportions car leurs offres sont parfaitement élastiques. Ces augmentations atteignent environ 14,7% avec le calibrage GTAP-BIO, 17,6% avec notre calibrage alternatif. Il y a donc bien une augmentation de l'usage des autres intrants (de l'ordre de 3%) qui peut conduire à une augmentation des émissions directes. Ces augmentations d'utilisation d'intrants sont moindres au niveau du total européen des cultures arables avec respectivement 2,6% et 3,9%, soit une différence de 1,3%. Au niveau mondial, la différence est encore plus modeste avec respectivement 0,8% et 0,9%, soit une augmentation limitée à 0,1%.

Les émissions directes de GES sont relativement peu étudiées avec les modèles économiques susmentionnés. Le cadre GTAP-BIO n'est pas non plus idéal pour une telle analyse car les différents intrants (fertilisants, pesticides, semences) ne sont pas distingués. Notre modeste contribution ici est de montrer qu'il peut y avoir une hausse modeste des émissions directes (0,1% au niveau mondial) associée à la diminution des émissions indirectes causées par le CAS.

**Tableau 11 : Impacts sur les surfaces globales du choc de consommation de biodiesel en Europe de 10 millions tep (en milliers d'hectares)**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
<i>Calibrage GTAP-BIO</i>							
Surfaces arables	153,5	801,27	366,60	5,79	59,55	6,18	2501,16
Prairies	-177,86	-196,97	-254,43	-96,58	-18,10	-8,96	-1947,23
Forêts	24,38	-604,30	-112,13	90,79	-41,47	2,70	-553,36
<i>Calibrage alternatif</i>							
Surfaces arables	36,03	221,58	108,16	-0,54	18,93	8,22	550,31
Prairies	-58,24	-20,20	-80,94	-27,20	-4,74	-3,51	-473,56
Forêts	22,30	-201,36	-27,18	27,78	-14,20	-4,70	-76,42

Examinons maintenant la sensibilité de nos résultats à l'horizon temporel. L'hypothèse de mobilité parfaite de tous les facteurs de production, sauf la terre, est certainement excessive à moyen terme (les capitaux physiques et humains sont en partie spécifiques aux secteurs d'activité). Par exemple Laborde considère que le travail non qualifié est imparfaitement mobile entre secteurs d'activité. Keeney et Hertel (2009) considèrent aussi qu'à moyen terme (approximativement 5 ans) le travail et le capital ne peuvent pas s'ajuster complètement. Ils modélisent alors une mobilité imparfaite de ces facteurs avec des élasticités de mobilité proche de l'unité (valeur qui provient également de la synthèse OCDE). Aussi nous adoptons ces valeurs pour obtenir des effets moyen terme. Cela implique qu'au point de calibrage les élasticités surface, rendement et offre sont réduites. Pour les graines oléagineuses européennes, l'élasticité prix propre de l'offre est de 1,56 avec les élasticités de substitution GTAP-BIO et de 1,85 avec les élasticités de substitution fixées à 0,3 (pour rappel, elles s'élèvent respectivement à 5,73 et 8,63 dans le long terme). Les résultats d'un choc de 10 millions de tep sont reportés dans les tableaux 12 et 13 (à comparer aux tableaux 10 et 11). Les effets sont qualitativement identiques pour un choc d'un million de tep.

**Tableau 12 : Impacts à moyen terme sur les offres, surfaces, rendements et prix des graines oléagineuses du choc de consommation de biodiesel en Europe de 10 millions de tep(en %)**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
<i>Calibrage GTAP-BIO</i>							
Offre	2,99	9,50	4,40	1,49	0,70	2,56	3,14
Surface	2,16	8,88	3,91	1,16	0,55	1,83	2,54
Rendements	0,83	0,62	0,49	0,33	0,15	0,73	0,59
Prix	3,35	7,51	4,07	1,66	1,28	4,08	3,11
Contribution rendements (%)	27,85	6,54	11,15	22,08	20,93	28,63	18,94
<i>Calibrage alternatif</i>							
Offre	3,09	10,27	4,88	1,29	0,67	2,40	3,23
Surface	1,71	6,73	2,67	0,87	0,48	1,65	1,91
Rendements	1,38	3,54	2,21	0,42	0,19	0,75	1,32
Prix	2,44	6,09	2,95	1,15	0,92	3,38	2,34
Contribution rendements (%)	44,78	34,49	45,20	32,82	28,61	31,24	40,92

Les principaux résultats remarquables sont une augmentation des effets prix car l'offre devient moins élastique à moyen terme. Corrélativement nous obtenons une augmentation moindre de la production globale (baisse des demandes pour l'alimentation). L'augmentation du prix mondial des graines oléagineuses à moyen terme atteint 3,11% (contre 1,66% à long terme) avec les élasticités GTAP-BIO. Notons aussi l'augmentation de la production de graine oléagineuse plus uniformément répartie au niveau mondial (il devient relativement plus difficile d'augmenter la production européenne). Par conséquent, les effets rendements sont relativement moins importants (moins de 19% à moyen terme contre plus de 24% à long terme). Lorsque nous augmentons les élasticités de substitution à 0,3, ces effets rendements augmentent mais relativement moins : à moyen terme ils atteignent moins de 41% alors qu'ils étaient de plus de 52% à long terme.

Au niveau des surfaces, les effets sont également modifiés avec désormais des CAS de l'ordre de 0,22 ha/tep et 0,06ha/tep. Les émissions associées de GES diminuent toujours mais relativement moins, passant de 59,5 à 18,4gCO<sub>2</sub>eq/MJ (soit une baisse de 70%). Cette plus faible baisse s'explique simplement par une plus faible augmentation de la contribution des rendements aux augmentations de production.

**Tableau 13 : Impacts à moyen terme sur les surfaces globales du choc de consommation de biodiesel en Europe de 10 millions de tep (en milliers d’hectares)**

	Etats-Unis	Europe	Brésil	Chine	Inde	Asie Sud Est	Monde
<i>Calibrage GTAP-BIO</i>							
Surfaces arables	170,21	584,06	355,41	17,86	91,82	11,24	2246,22
Prairies	-184,14	-158,54	-211,62	-103,33	-23,00	-8,19	-1639,96
Forêts	13,86	-425,54	-143,78	85,46	-68,82	-3,03	-606,34
<i>Calibrage alternatif</i>							
Surfaces arables	52,02	162,14	109,02	7,31	44,51	13,10	629,94
Prairies	-70,96	-28,83	-55,25	-39,74	-9,00	-3,03	-430,44
Forêts	19,04	-133,33	-53,78	32,41	-35,48	-10,10	-199,40

#### 4 Conclusions

La mesure des effets sur les surfaces et émissions induites de GES par le développement des biocarburants est une question empirique difficile car de nombreux mécanismes économiques interagissent. De nombreux modèles économiques capturant ces mécanismes ont alors été mobilisés pour estimer ces effets. Dans le cas du biodiesel européen, ces travaux économiques concluent majoritairement à des effets de déplacements de surface et d’émissions associées de sorte que l’efficacité de l’action publique européenne est remise en cause. Dans ce papier, nous avons focalisé notre attention sur les hypothèses des modèles économiques mobilisés concernant les évolutions possibles des rendements. Nous avons également analysé les résultats de simulations en termes d’évolution des surfaces et des rendements.

Tous les travaux trouvent que les augmentations de production nécessaires pour satisfaire les demandes de biocarburants seront essentiellement obtenues par des augmentations de surface. Les rendements augmentent au mieux modestement. Dans les modèles d’équilibre partiel, ce résultat est lié à l’absence supposée de progrès technique induit suite au choc de biocarburants. Nous montrons que, dans les modèles d’équilibre général, cela provient assez directement des valeurs calibrées des élasticités de substitution qui gouvernent l’arbitrage entre la terre et les autres intrants agricoles. Les valeurs calibrées sont plus faibles que celles données par les estimations économétriques aujourd’hui disponibles.

Cela nous a conduit à vouloir tester l’influence de ces choix de calibrage sur les résultats CAS et émissions associées induit par le développement du biodiesel en Europe. Ce test est réalisé à partir du modèle GTAP-BIO qui est proche dans sa structure du modèle MIRAGE-BioF retenu par la CE pour justifier ses propositions de révision des directives européennes. Nous montrons alors que les estimations des effets CAS et émissions associées sont très sensibles aux valeurs des élasticités de substitution. Lorsque les valeurs calibrées s’appuient sur les

résultats économétriques, alors les effets CAS et émissions à long terme sont réduits de près de 80%. Nous montrons également que dans ce cas, la contribution des effets rendements à l'augmentation de la production ne dépasse pas celle qui est généralement projetée à moyen terme.

L'attention est portée dans ce travail uniquement sur les CAS et émissions associées. Il conviendrait de poursuivre ce travail par exemple par une analyse de l'efficacité de l'action publique européenne sur les biocarburants. Nos calculs suggèrent que le bilan en termes d'émissions nettes de GES des biocarburants est plus élevé que celui estimé jusqu'à présent. Est-ce pour autant la meilleure politique pour atteindre les objectifs d'atténuation du changement climatique ? Par exemple, faut-il privilégier les biocarburants de seconde génération à ceux de première génération ? Cela dépend entre autres des gains technologiques relatifs espérés dans ces deux filières. Nos résultats montrent simplement qu'il ne faut pas forcément sous estimer les gains possibles de la filière de première génération.



## Références

- Abler, S. (2001). Elasticities of Substitution and Factor Supply in Canadian, Mexican and United States Agriculture. Annex 2 to the OECD report “Market Effects of Crop Support Measures”.
- Babcock, B.A., Carriquiry, M. (2010). An Exploration of Certain Aspects of CARB’s Approach to Modeling Indirect Land Use from Expanded Biodiesel Production. CARD Staff Report 10-SR25, 39 p.
- Blanco Fonseca, M., Burrell, A., Gay, H., Henseler, M., Kavallari, A., M’Barek, R., Perez Dominguez, I., Tonini, A. (2010). Impacts of the EU biofuel target on agricultural markets and land use: a comparative modeling assessment. JRC Scientific and Technical Reports, disponible à
- Britz, W., Hertel, T.W. (2011). Impacts of EU biofuels directives on global markets and EU environmental quality: An integrated PE, global CGE analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 142: 102-109.
- Broch, A., Hoekman, S.K., Unnasch, S. (2013). A review of variability in indirect land use change assessment and modeling in biofuel policy. *Environmental Science and Policy*, 29: 147-157
- CARB (2010). Land Use Change Effects for Soy Biodiesel and Renewable Diesel, disponible à <http://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs-background.htm#modeling>
- Carpentier, A., Letort, E. (2012). Accounting for heterogeneity in multicrop micro-econometric models: implications for variable input modeling. *American Journal of Agricultural Economics*, 94: 209-224
- CE (2012). Impact Assessment accompanying the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 90/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources. Commission Staff Working Document SWD(2012) 343 final, disponible à [http://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/doc/biofuels/swd\\_2012\\_0343\\_ia\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/renewables/biofuels/doc/biofuels/swd_2012_0343_ia_en.pdf)
- De Cara, S., Goussebaile, A., Grateau, R., Levert, F., Quemener, J., Vermont, B. (2012). Revue critique des études évaluant l’effet des changements d’affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants. Rapport ADEME disponible

à [http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=7AC5DFA02A2CE66DFDE000D7FA33AA56\\_tomcatlocal1333626720098.pdf](http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=7AC5DFA02A2CE66DFDE000D7FA33AA56_tomcatlocal1333626720098.pdf).

Dumortier, J., Hayes, D., 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.

Edwards, R., Mulligan, D., Marelli, L. (2010). Indirect Land Use Change from Increased Biofuels Demand: Comparison of Models and Results for Marginal Biofuels Production from Different Feedstocks. Scientific and Technical Reports of the Joint Research Center, European Commission, disponible à [http://ec.europa.eu/energy/renewables/consultations/doc/public\\_consultation\\_iluc/study\\_4\\_iluc\\_modelling\\_comparison.pdf](http://ec.europa.eu/energy/renewables/consultations/doc/public_consultation_iluc/study_4_iluc_modelling_comparison.pdf)

Elobeid, A.E., Carriquiry, M.A., Fabiosa, J.F. (2012). Land-Use Change and GreenHouse Gas Emissions in the FAPRI-CARD model system: Addressing Bias and Uncertainty. *Climate Change Economics*, 3(3): 1-26

Golub, A., Hertel, T.W. (2012). Modeling Land-Use Change Impacts of Biofuels in the GTAP-BIO Framework. *Climate Change Economics*, 3(3): 1-30

Huang, H., Khanna, M. (2010). An econometric analysis of US crop yield and cropland acreage. Discussion paper, Univ of Illinois, Urbana Champaign.

Keeney, R., Hertel, T.W. (2009). Indirect land use impacts of US biofuels policies: The importance of acreage, yield and bilateral trade responses. *American Journal of Agricultural Economics*, 91: 895-909

Laborde D. (2011). Assessing the land use change consequences of European biofuel policies. Final report for the Directorate General for Trade of the European Commission, 111 p, disponible à [http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2011/october/tradoc\\_148289.pdf](http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2011/october/tradoc_148289.pdf)

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):1-39

Rosegrant, M., Ringler, C., Msangi, S., Sulser, T.B., Zhu, T., Cline, S. (2008). International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade: Model Description. Disponible à <http://www.ifpri.org/publication/international-model-policy-analysis-agricultural-commodities-and-trade-impact-0>

Salhofer, K. (2001). Elasticities of Substitution and Factor Supply in European Agriculture: A Review of Past Studies. Annex 3 to the OECD report “Market Effects of Crop Support Measures”

Searchinger, T.D., Heimlich, R., Houghton, R.A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T. (2008). Use of croplands for biofuels increase greenhouse gases through emissions from land use change. *Science*, 319: 1238-1240.

**Les Working Papers SMART – LERECO sont produits par l'UMR SMART et l'UR LERECO**

- **UMR SMART**

L'Unité Mixte de Recherche (UMR 1302) *Structures et Marchés Agricoles, Ressources et Territoires* comprend l'unité de recherche d'Economie et Sociologie Rurales de l'INRA de Rennes et les membres de l'UP Rennes du département d'Economie Gestion Société d'Agrocampus Ouest.

Adresse :

UMR SMART - INRA, 4 allée Bobierre, CS 61103, 35011 Rennes cedex  
UMR SMART - Agrocampus, 65 rue de Saint Briec, CS 84215, 35042 Rennes cedex

- **LERECO**

Unité de Recherche *Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Economie*

Adresse :

LERECO, INRA, Rue de la Géraudière, BP 71627 44316 Nantes Cedex 03

Site internet commun : <http://www.rennes.inra.fr/smart/>

**Liste complète des Working Papers SMART – LERECO :**

<http://www.rennes.inra.fr/smart/Working-Papers-Smart-Lereco>

<http://econpapers.repec.org/paper/raewpaper/>

**The Working Papers SMART – LERECO are produced by UMR SMART and UR LERECO**

- **UMR SMART**

The « Mixed Unit of Research » (UMR1302) *Structures and Markets in Agriculture, Resources and Territories*, is composed of the research unit of Rural Economics and Sociology of INRA Rennes and of the members of the Agrocampus Ouest's Department of Economics Management Society who are located in Rennes.

Address:

UMR SMART - INRA, 4 allée Bobierre, CS 61103, 35011 Rennes cedex, France  
UMR SMART - Agrocampus, 65 rue de Saint Briec, CS 84215, 35042 Rennes cedex, France

- **LERECO**

Research Unit *Economic Studies and Research Lab*

Address:

LERECO, INRA, Rue de la Géraudière, BP 71627 44316 Nantes Cedex 03, France

Common website: [http://www.rennes.inra.fr/smart\\_eng](http://www.rennes.inra.fr/smart_eng)

**Full list of the Working Papers SMART – LERECO:**

[http://www.rennes.inra.fr/smart\\_eng/Working-Papers-Smart-Lereco](http://www.rennes.inra.fr/smart_eng/Working-Papers-Smart-Lereco)

<http://econpapers.repec.org/paper/raewpaper/>

**Contact**

**Working Papers SMART – LERECO**

INRA, UMR SMART

4 allée Adolphe Bobierre, CS 61103

35011 Rennes cedex, France

**Email :** [smart\\_lereco\\_wp@rennes.inra.fr](mailto:smart_lereco_wp@rennes.inra.fr)

---

**2013**

**Working Papers SMART – LERECO**

UMR INRA-Agrocampus Ouest **SMART** (Structures et Marchés Agricoles, Ressources et Territoires)

UR INRA **LERECO** (Laboratoires d'Etudes et de Recherches en Economie)

Rennes, France

---