



HAL
open science

Évaluation des impacts de l'utilisation de biocarburants de seconde génération sur les usages des sols. Analyse en équilibre général calculable. Le cas du Miscanthus en Union Européenne

Anabelle Couleau

► **To cite this version:**

Anabelle Couleau. Évaluation des impacts de l'utilisation de biocarburants de seconde génération sur les usages des sols. Analyse en équilibre général calculable. Le cas du Miscanthus en Union Européenne. Sciences agricoles. 2012. dumas-00755476

HAL Id: dumas-00755476

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00755476>

Submitted on 21 Nov 2012

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

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



AGROCAMPUS OUEST

CFR Rennes
65 rue de Saint Briec
CS 84215
35042 Rennes Cedex
Tél : 02 23 48 55 00



**International Food Policy
Research Institute**
Market, Trade and Institutions
Division (MTID)
2033 K St, NW
Washington, DC 20006-1002 USA

Mémoire de fin d'études*

**Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques,
Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année universitaire : **2011- 2012**

Spécialisation: **Politiques et marchés de l'Agriculture et des Ressources (POMAR)**

Bon pour dépôt (version définitive) <input type="checkbox"/>	
Date :/.../... Signature :	Autorisation de diffusion : Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/>

**EVALUATION DES IMPACTS DE L'UTILISATION DE BIOCARBURANTS DE SECONDE
GENERATION SUR LES USAGES DES SOLS. ANALYSE EN EQUILIBRE GENERAL
CALCULABLE.**

LE CAS DU MISCANTHUS EN UNION EUROPEENNE

Mlle Anabelle Couleau

Soutenu à Rennes, le : 12 Septembre 2012

Devant le jury :

Sous la présidence de : *Mme LAROCHE-DUPRAZ Cathie*

Maître de stage : *M. LABORDE David représenté par Mme FEMENIA Fabienne (IFPRI)*

Enseignant référent : *Mme LAROCHE-DUPRAZ Cathie*

Autres membres du jury : *M. GOHIN Alexandre, Directeur de recherche INRA*

"Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST".

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement Cathie Laroche-Dupraz, mon enseignante référente pour ce stage de fin d'étude. Ses instructions, son encouragement et son soutien continuels tout au long du stage m'ont été d'une aide précieuse.

Je remercie également Fabienne Femenia pour la préparation logistique de mon stage et plus spécialement pour son soutien quotidien lors de ses passages à l'IFPRI. Son expérience de modélisation en équilibre général calculable m'aura également permis de prendre du recul sur les méthodes utilisées.

A David Laborde pour avoir accepté d'être mon maître de stage durant ces six mois et pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon mémoire sur ce sujet d'actualité en cette année 2012.

Je tiens également à remercier Alexandre Gohin, pour son aide tout au long de ce projet de recherche depuis la réflexion sur la problématique jusqu'à sa présence dans le jury.

Merci à Antoine Bouët pour sa disponibilité et ses explications sur le modèle MIRAGE standard durant son court passage à l'IFPRI ainsi qu'à Hugo Valin pour son aide technique dans l'utilisation de MIRAGE-BioF.

Un grand merci à l'équipe générale de la division « Market, Trade, Institutions » qui auront rendu cette expérience et ce séjour agréable : Sara, Marcelle, Carmen, Ulrike, Betina, Lauren, Mike, Will, Monica, Fousseini (ainsi que les nombreux *Research Assistants* qui ont pris de nouvelles voies au cours de l'été 2012) pour leur bienveillance et leur volonté de maintenir une ambiance à la fois studieuse et amicale.

Un merci tout particulier à Toyin pour son écoute, son soutien et sa patience chaque jour de mon stage.

Enfin, je remercie chaleureusement mes proches et mes amis tant en France qu'aux Etats-Unis pour leur compréhension dans cette expérience.

Table des matières

GLOSSAIRE	4
LISTE DES FIGURES	5
LISTES DES TABLES ET ILLUSTRATIONS	5
UNITES DE CONVERSION	5
INTRODUCTION	6
PARTIE I DEFINITIONS ET CONTEXTE	10
I.1. SEMANTIQUE	10
I.2. LES CAS LIES AU DEVELOPPEMENT DES BIOCARBURANTS	11
I.3. ORIGINE DE L'ERREUR DE PRISE EN COMPTE	13
I.4. DISTINCTION FLOUE ENTRE LES CHANGEMENTS D'ALLOCATION DES SOLS DIRECTS ET INDIRECTS (CASD ET CASI)	14
I.5. LES PROJETS PILOTES DE PRODUCTION DE BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION	16
I.6. LES POLITIQUES PUBLIQUES EN FAVEUR DES BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION : UE ET EU	17
PARTIE II CARACTERISTIQUES DU MISCANTHUS : UNE CULTURE DEDIEE AUX BIOCARBURANTS « SECONDE GENERATION »	22
II.1. CARACTERISTIQUES AGRONOMIQUES ET ENERGETIQUES	22
II.2. PRODUCTIVITE DES SOLS ET SUBSTITUTION DES TERRES	25
A- CONCEPT DE TERRES MARGINALES	26
B- LES USAGES DES SOLS : SUBSTITUTION ET EXPANSION	27
C- METHODOLOGIE DE MODELISATION DES RENDEMENTS DU MISCANTHUS SUR TROIS TYPES DE SOLS	27
PARTIE III MIRAGE-BioF : UN MODELE D'EQUILIBRE GENERAL CALCULABLE DEDIE AUX BIOCARBURANTS	32
III.1. ORIGINE DU MODELE	32
III.2. ADAPTATION AUX BIOCARBURANTS DE PREMIERE GENERATION	34
III.3. LE MARCHÉ DE LA TERRE ET LES MECANISMES DE REALLOCATION	37
III.4. METHODOLOGIE SUR LA BASE DE DONNEES : INSERTION DES BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION	43
III.5. SCENARIOS ENVISAGES	47
CONCLUSION ET DISCUSSION	52
REFERENCES	54
SITOGRAPHIE	57

Glossaire

ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
BBD	Biomass-based diesel
BCAP	Biomass Crop Assistance Program
BEPAM	Biofuel and Environmental Policy Analysis Model
CAS	Changement d'allocation des sols
CASd	Changement d'allocation des sols directs
CASi	Changement d'allocation des sols indirects
CEPII	Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales
DG TRADE	Direction générale au Commerce
DG CLIMAT	Direction générale au Climat
EBB	European Biodiesel Board
EGC	Equilibre Général Calculable
EISA	Energy Independence and Security Act
EP	Equilibre partiel
EPA	(US) Environmental Protection Agency
EPPA	The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis model
EU	Etats-Unis
FQD	Directive « Qualité des carburants » 2009/30/CE dite FQD
FTD	Fischer-Tropsch Diesel
GGE	Gallon Gasoline Equivalent
GJ	Gigajoule
GLOBIOM	Global Biomass Optimization Model
GTAP	Global Trade Analysis Project
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
IEA	International Energy Agency
IFPRI	International Food Policy Research Institute
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
JRC	Joint Research Center
LHV/HHV	Low Heating value/High Heating Value
LEI-TAP	Extended version of the GTAP model, under responsibility of LEI (Agricultural Economic Research Institute), Netherlands
MCS	Matrice de Comptabilité Sociale
MIRAGE-bioF	Modeling International Relationship in Applied General Equilibrium for bioFuel analysis
MJ	Mégajoule
Mtoe	Million tons of oil equivalent (Million de tonnes équivalent pétrole Mtep)
NREAPs	National Renewable Energy Actions Plans
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
RED	Directive « Energie Renouvelable » 2009/29/CE dite RED
TCR	Taillis à courte rotation
UE	Union Européenne
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
US	United States

Liste des figures

FIGURE 1. COMPARAISON SCHEMATIQUE DES EMISSIONS DE GES ISSUES DES ACV CLASSIQUES COMPARANT CARBURANT FOSSILE ET BIOCARBURANT.....	12
FIGURE 2. SCHEMATISATION SIMPLIFIEE DU PHENOMENE DES CAS : UN EXEMPLE DE DISTINCTION CAS DIRECT ET INDIRECT	15
FIGURE 3. PARTAGE PAR TYPE DE BIOCARBURANTS DANS LE RENEWABLE FUEL STANDARD (RFS, U.S.) EN 2022.....	18
FIGURE 4. MANDAT D'INCORPORATION DES BIOCARBURANTS DANS L'U.S. RFS D'ICI 2022 (EN MILLIARDS DE LITRES).	18
FIGURE 5. ESTIMATION (NREAPS) DU ROLE DES BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION D'ICI 2020.	20
FIGURE 6. RENDEMENT DU MISCANTHUS SUR SIX ANNEES.	22
FIGURE 7. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA PRODUCTION DANS MIRAGE-BIOF.....	35
FIGURE 8. STRUCTURE DE LA DEMANDE ADAPTEE A LA CONSOMMATION D'ENERGIE FINALE.	36
FIGURE 9. REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU MARCHE DE LA TERRE DANS MIRAGE-BIOF	38
FIGURE 10. REPRESENTATION DES SUBSTITUTIONS DANS LES ALLOCATIONS DE LA TERRE DANS LE MODELE GTAP-BIO-ADVFUEL.....	40
FIGURE 11. STRUCTURE DE COUT DE DEUX TYPES DE BIOCARBURANTS (ETHANOL CELLULOSIQUE ET FT-DIESEL) PRODUITS A PARTIR DE MISCANTHUS.....	44
FIGURE 12. TYPE DE BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION EN 2020, ESTIMATIONS ISSUES DES NREAPS, 2011.	48
FIGURE 13. PART DES BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION (EN ENERGIE KTOE) PAR PAYS UTILISEE DANS LES TRANSPORTS EN 2020.	49

Listes des tables et illustrations

TABLEAU 1. DIFFICULTES ASSOCIEES A LA MODELISATION DES CAS.	14
TABLEAU 2. EXEMPLES DE PROJETS PILOTES AUX ETATS-UNIS, BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION	16
TABLEAU 3. EXEMPLES DE PROJETS PILOTES EN UNION EUROPEENNE, BIOCARBURANTS DE SECONDE GENERATION.....	17
TABLEAU 4. COMPOSANTS LIGNO-CELLULOSIQUES DE DIFFERENTS MATERIAUX.	23
TABLEAU 5. DEFINITION DU CONCEPT DE TERRES « MARGINALES » (ADAPTE DE TANG ET AL, 2010).....	26
TABLEAU 6. GLASOD (GLOBAL ASSESSMENT OF DEGRADATION) : DEFINITIONS ET DONNEES POUR QUATRE DEGRES DE DEGRADATION.	30
TABLEAU 7. DESCRIPTION DES ITEMS DE COUTS DES DEUX TYPES DE BIOCARBURANTS (ETHANOL CELLULOSIQUE ET FT-DIESEL) PRODUITS A PARTIR DE MISCANTHUS.....	44
TABLEAU 8. EXEMPLE SIMPLIFIE DE DESAGREGATION D'UNE MCS CIBLANT LE SECTEUR DES BIOCARBURANTS.	46

Unités de conversion

0.089 GJ= 1 gallon d'éthanol

1 metric ton of biodiesel = 37.8 GJ (33.3-35.7 MJ/Liter)

1 gallon gasoline equivalent (gge)= 121 MJ

1kg d'éthanol=26,9 MJ

1 liter = 0.26 gallon

1 KWh= 3.6 MJ

1 MToe= 42 GJ

Introduction

Les biocarburants de seconde génération, à l'aube d'une entrée en commercialisation, font l'objet d'une attention grandissante.

*“ Any US policies in 2012 to create incentives for the use of second-generation biofuels feedstocks (such as Switchgrass, Miscanthus, or other dedicated energy biomass) will promote innovation and encourage the US biofuels sector to diversify its sources of feedstock beyond grains to include agricultural residues (such as the Corn Stover left behind harvesting). ”*¹ (2011 IFPRI Global Report, présenté en Avril 2012).

Les parties prenantes de ces nouvelles générations de bioénergies (biocarburants, bioélectricité et chaleur) ont été réunies à Washington en Juillet 2012, pour débattre de l'opportunité de les commercialiser au regard des objectifs de sécurité énergétique, de bénéfices environnementaux et d'amélioration des profits agricoles.

*« We need to bring together leaders in industry, government, and research to discuss the future of biomass feedstock. We will address key challenges and new opportunities and highlight the critical role of feedstock logistics in scaling-up to a national bioenergy industry. »*² Valerie Reed (Acting Biomass Program Director, U.S. Department of Energy, Conference July 2012).

En France, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) souligne également, en Avril 2012, qu'elle « participe aux efforts de recherche sur les biocarburants avancés ». Depuis 2008, elle finance notamment deux projets de production de biocarburants avancés dans le cadre du Fonds démonstrateur de Recherche sur les biocarburants de seconde génération.³

Les biocarburants de seconde génération peuvent être produits à partir de cultures qui ne sont pas destinées à l'alimentation telles que les cultures énergétiques dédiées (comme le Miscanthus et le Switchgrass); à partir des taillis à courtes rotations (le Peuplier hybride, le Robinier, le Saule, l'Eucalyptus principalement) ; à partir des parties non comestibles de cultures agricoles (feuilles et tiges issues de la culture de maïs, blé ou de canne à sucre par exemple) ou encore à partir de résidus forestiers (OCDE/IEA, 2010). Ces espèces végétales (partie ou plante entière) possèdent une forte teneur en biomasse ligno-cellulosique, une composante essentielle convertie – par différentes voies de transformation – en biocarburants, chaleur et électricité. Bien que les procédés de conversion fassent encore l'objet d'études de recherche intense, les premiers projets pilotes produisant des biocarburants de seconde génération sont en 2012 sur le point de passer à l'étape d'augmentation d'échelle de production et de commercialisation (cf. partie I.4).

Les biocarburants de première génération sont enlisés au cœur d'un débat remettant en cause leur réduction effective de gaz à effet de serre (GES). En effet, ces derniers ne peuvent être commercialisés que s'ils permettent de réduire les émissions de GES d'au moins 35 % en

¹ Traduction française : En 2012, les politiques publiques des Etats-Unis incitant à l'utilisation de la biomasse pour la production de biocarburants de seconde génération (telles que le Switchgrass, Miscanthus et autres biomasse dédiées aux bioénergies) stimulent l'innovation et encouragent le secteur des biocarburants des Etats-Unis à diversifier ses sources de matières premières au-delà des grains, tels que les résidus agricoles (résidus de maïs laissés au sol après la récolte). Disponible à : <http://www.ifpri.org/node/8439>, consulté le 23 Avril

² Traduction française : Nous nous devons de rassembler les leaders du monde industriel, gouvernemental et de la recherche pour débattre de l'avenir de la biomasse destinée à la production de bioénergies. Nous leur adressons non seulement les défis majeurs et les nouvelles opportunités mais aussi soulignons le rôle critique de la logistique (collecte, stockage, distribution, ...) de cette biomasse dans l'ajustement d'accroissement d'échelle des industries à un niveau national.

³ Avis Ademe, « biocarburants de première génération », publié en Avril 2012. Les deux projets concernent les biocarburants de seconde génération par voie thermochimique. De plus, elle vient de lancer un nouvel appel à projet pour cette nouvelle génération de biocarburants.

2010 (Directive EC/2009)⁴. Les analyses de cycle de vie (ACV) calculent les émissions de GES aux différentes étapes de la chaîne de production. Les ACV actuelles démontrent que les biocarburants de première génération répondent aux critères environnementaux des législations nationales à la condition que l'on ne tienne pas compte des émissions de GES associées aux changements d'allocation des sols (CAS) (Cara et al., 2012). Dans la littérature deux types de changements d'allocation des sols sont communément distingués : les CAS directs et indirects. Si les cultures destinées aux biocarburants sont plantées sur des terres initialement « non cultivées », les CAS sont dits « directs ». Si les cultures sont cultivées sur des terres arables existantes pour produire des biocarburants au lieu d'être destinées à l'alimentation humaine ou animale, les CAS sont alors dits « indirects » du fait de la nécessité de déplacer les cultures alimentaires. Plusieurs études ont montré que si les émissions associées aux CAS étaient prises en compte, les biocarburants s'avèreraient totalement inefficaces en terme de réduction des GES par rapport à la législation requise et pourraient même dans certains cas les augmenter (Cara et al., 2012; Laborde, 2011a; Searchinger et al., 2008).

Si les biocarburants ne permettent pas de réduire les émissions de GES, cet argument ne peut être utilisé pour justifier de la politique publique d'aide aux biocarburants. **C'est en ce sens, qu'une controverse fait actuellement l'objet d'un débat houleux parmi les experts sur la question des CAS et les émissions de GES qui leur sont associées.**

A l'heure où un débat vif a lieu entre les parties prenantes pour établir quelle est la politique d'aide aux biocarburants de seconde génération la plus opportune et adéquate en Union européenne (UE) et aux Etats-Unis (EU), **l'évaluation de leur efficacité environnementale est cruciale. L'objet de recherche de ce mémoire de fin d'étude s'inscrit dans ce questionnement.** Il vise à apporter un nouvel éclairage sur l'efficacité environnementale des biocarburants de seconde génération. L'urgence de cet objectif est motivée par deux faits majeurs :

- 1- Premièrement, **d'importants investissements ont été réalisés au cours des années 2007-2011 sur des projets pilotes, notamment en UE et aux EU** mais aussi dans les pays émergents (Brésil, Chine, ...).
- 2- Deuxièmement, **une politique publique d'encouragement à la production et à la consommation des biocarburants de seconde génération** a été mise en place aux Etats-Unis (2007⁵) et en UE (2009⁶).

Bien que l'étude des émissions de GES pour les biocarburants de seconde génération ait fait l'objet de précédentes recherches (Gurgel, Reilly, & Paltsev, 2007 - dont les travaux ignorent le secteur de première génération), peu d'entre elles intègrent les émissions de GES associées aux changements d'allocation des sols directs et indirect (CASd+i) (Chen, Khanna, & Huang, 2012; Havlík et al., 2011) dans leurs analyses. Ce rapport construit une méthodologie qui permettra d'intégrer cette composante indispensable à l'heure où de nombreux projets de production de biocarburants dits celluloseux (ou de seconde génération) sont à l'aube de passer à l'étape de commercialisation.

Sont-ils plus efficaces que les biocarburants de première génération en termes de réduction des GES, si oui dans quelles mesures ? Si cette nouvelle génération de biocarburants ne répond pas aux critères de durabilité environnementale, quelle est leur efficacité

⁴ Ce seuil minimum sera relevé à 45, 50 et 60 % en 2015, 2017 et 2018 respectivement (en Union européenne) pour tous types de biocarburants. Aux U.S, une réduction des GES d'au moins 60% aux U.S. est requise pour les biocarburants celluloseux (Yacobucci & Bracmort, 2010).

⁵ Renewable Fuel Standard 2 (RFS2) under the Energy Independence and Security Act (EISA) of 2007.

⁶ Directive « énergies renouvelables » / Renewable Energy Directives (RED, 2009).

environnementale ? Et donc, quelle est la viabilité économique des projets d'investissement ?⁷ L'intérêt d'utiliser un cadre d'analyse en équilibre général calculable pour étudier la question de l'impact des biocarburants de 2nd génération sur les CAS repose non seulement sur la prise en compte des relations intersectorielles entre le secteur des biocarburants et les autres secteurs (notamment, agricoles et énergétiques) mais autorise également un traitement particulier du facteur de production clé, la terre. Une des difficultés inhérente à ce type d'approche consiste en ce que les modèles en équilibre général calculable (EGC) sont très dépendants d'une grande quantité d'input et très peu de données sont actuellement disponibles pour étudier cette question. Jusqu'à présent, la plupart des approches en EGC à une échelle mondiale reposent sur la base de données Global Trade Analysis Project (GTAP). L'évaluation de la politique des biocarburants n'est pas une exception, de nombreux modélisateurs ont développé des techniques pour faire face à l'absence du secteur des biocarburants dans la version de la base de données GTAP (Kretschmer & Peterson, 2008⁸).

Ce rapport est structuré en trois parties. Dans une première partie, nous exposons le contexte des CASi et pourquoi ces derniers sont indispensables dans l'évaluation de la viabilité environnementale des biocarburants de seconde génération ainsi que les projets pilotes actuels pour cette nouvelle génération et enfin, quelles sont les politiques d'incitation à la production et à la consommation en Union Européenne et aux Etats Unis. Nous restreindrons le secteur des biocarburants de seconde génération à deux types de biocarburants : l'éthanol cellulosique et le Fischer-Tropsch Diesel (FTD) produits à partir d'une même matière première « la biomasse ligno-cellulosique », représentée par « le Miscanthus » dans ce rapport. Dans une deuxième partie, après avoir rappelé les caractéristiques agronomique et énergétique de cette biomasse, nous élaborons une méthodologie de modélisation des rendements pour le Miscanthus selon les types de sols. Le mécanisme de réallocations des surfaces en terre lors de l'introduction de cette nouvelle biomasse est également étudié. Dans une troisième partie, nous décrivons brièvement les principales caractéristiques du modèle d'équilibre général calculable (MEGC) MIRAGE-BioF et en quoi il constitue un outil adapté à notre objet d'étude. L'introduction des biocarburants de seconde génération impliqueront des modifications du côté de l'offre et de la demande. Nous développons deux éléments clés de l'offre de biocarburants, le marché de la terre (et les notions associées de substitution et d'expansion) d'une part et la technologie de transformation d'autre part. Sur ce dernier point, nous présentons une structure des coûts pour les biocarburants de seconde génération construite à partir des données issues de la littérature. Ces jeux de données nouvellement créés permettront d'intégrer le secteur des biocarburants de seconde génération dans le modèle d'équilibre général calculable (MEGC) MIRAGE-BioF. Enfin, des scénarios de chocs sur la demande en biocarburants de 2nde génération sont proposés à l'horizon 2020. Le niveau de cette demande additionnelle est estimé au travers des objectifs que se sont fixés les pays membres de l'Union européenne⁹. Enfin, nous concluons sur une discussion et sur les limites de notre approche encore précoce.

⁷ Sur ce dernier point, la question est légitime : en 2011, une usine de production d'éthanol cellulosique « Range Fuels Inc. » a fait faillite de manière spectaculaire, retenant l'attention de la presse américaine. Et non sans raison, l'usine a bénéficié de fonds publics sous les gouvernements Bush et Obama : 46,3 millions de dollars US. provenant du Département de l'Energie U.S. Ainsi que de 40 millions de dollars d'un prêt provenant du Département de l'Agriculture U.S.. (Source : <http://www.bloomberg.com/news/2011-12-02/range-fuels-cellulosic-ethanol-plant-fails-as-u-s-pulls-plug.html>, consulté le 20 Juin 2012).

⁸ Offrent un aperçu des différentes méthodes utilisées dans la littérature.

⁹ Par l'intermédiaire des NREAPs, les « National Renewable Energy Action Plans ».

Ce travail s'inscrit dans un projet plus large sur les biocarburants de seconde génération au sein du MTID/IFPRI¹⁰. Ce rapport est une contribution essentielle à l'intégration de l'utilisation de la biomasse ligno-cellulosique pour la production d'énergie dans le modèle en équilibre général MIRAGE-BioF et fait partie d'un ensemble de travaux plus large visant à évaluer son impact sur les changements d'allocation des sols. Il s'insère dans le cadre d'un projet collaboratif entre l'IFPRI et le *Joint Research Center, Institute for Energy ISPR*A pour contribuer aux efforts analytiques de la Commission Européenne en ce domaine.

¹⁰ MTID/IFPRI : *Market Trade and Institutions Division* de l'IFPRI

PARTIE I Définitions et contexte

I.1. Sémantique¹¹

Dans cette section, sont définies les principales notions afin de créer une cohérence sémantique sur les termes utilisés dans ce rapport et éviter toute confusion.

Biocarburants de première génération : valorisent les organes de réserve de la plante. Ils comprennent des technologies matures pour la production d'éthanol à partir de sucre issus de plantes sucrières (canne à sucre ou de betterave à sucre) ou d'amidon des céréales (blé, maïs, par exemple) et de biodiesel à partir d'huiles végétales (issues de cultures oléagineuses : colza, tournesol, palmier à huile, etc.) ou encore de graisses animales.

Biocarburants de seconde génération : ils sont définis dans l'article 21.2 de la directive européenne des « énergies renouvelables » (RED, 2009). Ils sont produits à partir de déchets, de résidus, de matériaux cellulosiques non alimentaires et de matériaux ligno-cellulosiques. Le produit final (éthanol ou diesel cellulosique par exemple) est proche de celui qui est issu de la technologie des premières générations. Le terme de biocarburant **cellulosique** est inclus dans la définition des biocarburants de seconde génération et fait référence à l'utilisation plus particulière de matière première ligno-cellulosique.

Biocarburants avancés : le terme “avancés” fait référence aux propriétés avancées des biocarburants, tels que Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), bipétroleum, bio-jet fuel, biobutanol, etc... Ces produits finaux peuvent être compatibles avec les infrastructures existantes ou offrir d'autres bénéfices techniques. L'objectif visé est de produire de tels biocarburants à partir de matières premières n'entrant pas en concurrence avec la production alimentaire.

Coproduits des biocarburants : Les procédés de fabrication de biocarburants de première génération (éthanol et biodiesel) génèrent des coproduits. Lors de la production d'éthanol, à partir de betterave, il s'agit de pulpes et de vinasses ; les pulpes sont notamment utilisées en alimentation animale pressée ou déshydratées. Pour les céréales, il s'agit des drèches, lesquelles trouvent des débouchés dans l'alimentation des bovins viandes et des poulets labels. Lors de la production de biodiesel, les coproduits sont principalement les tourteaux de colza et de tournesol (en France). Ces derniers prennent de plus en plus de place dans la part de matières premières utilisées dans l'alimentation animale et viennent remplacer partiellement le tourteau de soja en alimentation des bovins et des porcs¹². Les coproduits des biocarburants de seconde génération sont d'une toute autre nature. Les procédés de conversion pour cette nouvelle génération génèrent deux principaux coproduits : la bioélectricité et la chaleur¹³.

¹¹ Sources : <http://biomap.kcl.ac.uk>, consulté le 20 Juin 2012.

¹² En 2009, les tourteaux coproduits en France (colza et tournesol) représentent 13 % du total des matières premières utilisées par les industriels de l'alimentation animale (Source : Agreste Primeur n° 258, mars 2011).

¹³ <http://base.d-p-h.info/en/fiches/dph/fiche-dph-7439.html>, consulté le 03 Juillet 2012

I.2. Les CAS liés au développement des biocarburants

Pourquoi est-il important de prendre en compte des émissions associées aux CAS ? Dans quelle mesure convient-il de différencier les CASi des CASd ?

Pour les carburants fossiles, les émissions de GES proviennent en grande partie de l'étape de combustion qui revient à brûler du carbone initialement fossile en dioxyde de carbone (CO₂) s'accumulant dans l'atmosphère. Ce mécanisme est très différent pour les biocarburants. Bien que leur combustion soit également responsable d'émissions de CO₂, ce dernier provient de la fixation par les végétaux de carbone atmosphérique durant leur photosynthèse¹⁴. C'est en ce sens que certains scientifiques qualifient la matière première destinée aux biocarburants de « neutre en carbone ». Ainsi l'essentiel des émissions comptabilisées dans les analyses de cycle de vie classiques ont lieu durant les étapes de production de la matière première, du transport, de la transformation et de la distribution (Figure 1).

Le recours en grande quantité à des biocarburants s'apparente à une demande additionnelle de produits agricoles. Ce choc de demande provoque un ajustement à la hausse des prix sur les marchés qui incitent les producteurs à produire plus et les consommateurs à demander moins, et ce jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint. Si l'accroissement de l'offre qui en résulte se traduit en partie par une utilisation plus grande de terre, il conduit à des CAS (par exemple par la conversion de prairies ou de forêts en cultures). Si ces CAS donnent lieu à des émissions de GES (par exemple en libérant le carbone stocké dans les sols ou la biomasse aérienne¹⁵) l'effet bénéfique sur les émissions du fait de la substitution du carburant fossile par le biocarburant est amoindri d'autant. Il est même possible que l'effet net final corresponde à une augmentation des émissions nettes de GES (Cara et al., 2012).

¹⁴ Cf. cycle du carbone.

¹⁵ La biomasse aérienne est constituée de la biomasse ligneuse et non ligneuse (brindille, feuilles, tiges) et se distingue de la biomasse souterraine (souche et racines).

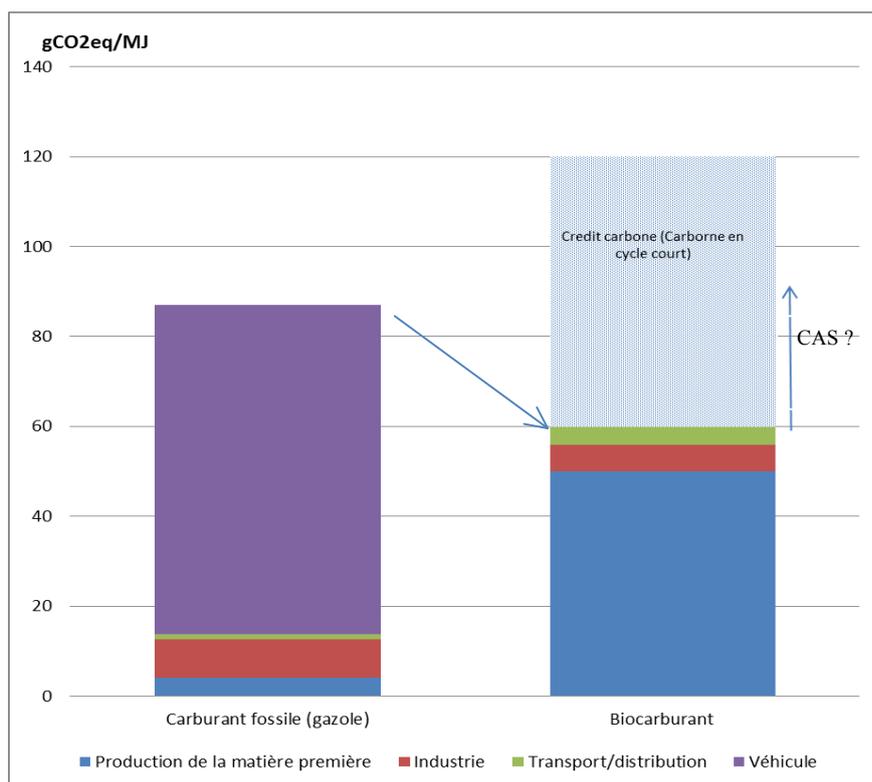


Figure 1. Comparaison schématique des émissions de GES issues des ACV classiques comparant carburant fossile et biocarburant.¹⁶

C'est sur cette différence que les ACV traditionnelles concluent généralement à un gain d'émission permis par l'utilisation des biocarburants. **Nous nous intéresserons, dans ce cadre comparatif, à la part des CAS induits par la production de biocarburants celluloseux.** Les émissions associées aux CAS compensent-elles le crédit carbone qui leur était alloués ?

La question des CAS induits par les biocarburants de première génération, a été analysée en détail dans une méta-analyse comparant 71 références¹⁷ par de Cara et al. (2012). *Il en ressort que pour plus d'un quart des évaluations collectées le seul effet des CAS induit des émissions supérieures à celles du carburant fossile de référence (83,8 gCO2eq/MJ).* S'y sont ajoutées les émissions associées aux biocarburants (pour les étapes de production, de transformation et de distribution), les émissions totales associées aux biocarburants sont supérieures à celles du carburant fossile de référence dans plus de la moitié des sources évaluées. En outre, dans cette même étude, plus de deux tiers des évaluations aboutissent à un bilan total en émissions qui ne permet pas de respecter le seuil législatif (fixé par la directive « énergie renouvelable », RED) de réduction des émissions de GES de 35% par rapport à celle du carburant fossile de référence (Cara et al., 2012).

¹⁶ Source: Ademe (2008), Cara et al., (2012).

¹⁷ 71 références fournissant 239 évaluations du facteur CASd et 561 évaluations du facteur CASd+i.

I.3. Origine de l'erreur de prise en compte

Si de nombreuses études soulignent que les bénéfices environnementaux de l'utilisation de biocarburants de première génération, pourtant fortement soutenus par les gouvernements, ne sont pas atteints en tenant compte des CAS, on peut se demander pourquoi ces émissions liées aux CAS ont été omises dans les analyses de cycle de vie. Haberl et al., (2012) se sont intéressés à cette erreur de prise en compte. L'hypothèse que tout type de biomasse est neutre en termes d'émissions de carbone prendrait sa source avec la mauvaise application du guide officiel sur la comptabilité nationale du niveau de carbone sous le cadre des Nations Unies de la Convention sur le Changement Climatique (UNFCCC). Sous les règles de comptabilité de l'UNFCCC, les pays rapportent séparément leurs émissions issues de leurs utilisations d'énergie et celles issues des changements d'affectation des sols. Par exemple, si un hectare de forêt est abattu et le bois est utilisé pour la production de bioénergie, la perte de carbone issue de la forêt est prise en compte en tant qu'émissions issues du changement d'usage du sol. Pour éviter le double comptage, les législations autorisent donc les pays à ignorer ce même carbone qui est émis lors de la combustion. Cette règle de comptabilité ne suppose pas que la biomasse est neutre en termes d'émissions de carbone mais plutôt que les émissions peuvent être reportées dans le domaine du changement d'allocation des sols. **Ce système de comptage est complet et précis parce que les émissions sont à la fois reportées dans le secteur de la terre et de l'énergie.**

La règle de comptage sous le protocole de Kyoto est différente : ces émissions de carbone issues de la consommation énergétique ne s'appliquent pas à une large échelle mais seulement à certains pays¹⁸. En excluant les émissions biogènes¹⁹ des systèmes énergétiques, le Protocole a fait une erreur car cette pratique signifie que ces émissions, dans certains cas, ne sont jamais comptées. **Similairement, de nombreuses politiques nationales et européennes et tout autant des analyses de cycles de vie et autres études, ignorent à tort les émissions biogènes issues de la consommation d'énergies en omettant d'inclure les variations de carbone lors des changements d'allocation des sols comme un résultat d'utilisation de la bioénergie** (Haberl et al., 2012).

¹⁸ Annexe I du Protocole de Kyoto.

¹⁹ Qui provient des êtres vivants. Ici, les émissions biogènes sont attribuées aux émissions de CO₂ issues de la biomasse.

I.4. Distinction floue entre les changements d'allocation des sols directs et indirects (CASd et CASi)

Tenant compte de cette erreur de prise en compte, pourquoi l'intégration des émissions reliées aux CAS dans les analyses de cycle de vie reste compliquée ?

Cara et al. (2012) ont distingué quatre difficultés associées à la modélisation des CAS (Tableau 1) :

Tableau 1. Difficultés associées à la modélisation des CAS.²⁰

	Difficultés	Implications
Difficulté 1	Les interactions qui lient les différents marchés agricoles	Demande une représentation correcte de l'ensemble des substitutions et des mécanismes de marchés à l'échelle globale.
Difficulté 2	La variabilité spatiale	Demande une analyse des phénomènes à une résolution spatiale suffisamment fine.
Difficulté 3	La nécessité de suivre dans le temps les usages des sols	Nécessite des bases de données conséquentes sur les différents types d'usage des sols, ces dernières étant nécessairement imparfaites.
Difficulté 4	La difficulté d'isoler le développement des biocarburants	Nécessite l'utilisation de modèles permettant de réaliser des simulations <i>ceteris paribus</i> afin d'isoler cet effet.

Au regard de ces difficultés, une première approche est de distinguer deux types de CAS : **les CAS directs** (résultent de conversions de terres destinées à produire des biocarburants) et **les CAS indirects** (lorsque les conversions sont dues à d'autres usages, alimentaires par exemple, qui n'auraient pas eu lieu s'il n'y avait pas eu de développement des biocarburants). Ces deux phénomènes sont illustrés de manière simplifiée et à titre d'exemple dans la Figure 2.

²⁰ Source: adapté de de Cara et al. (2012)

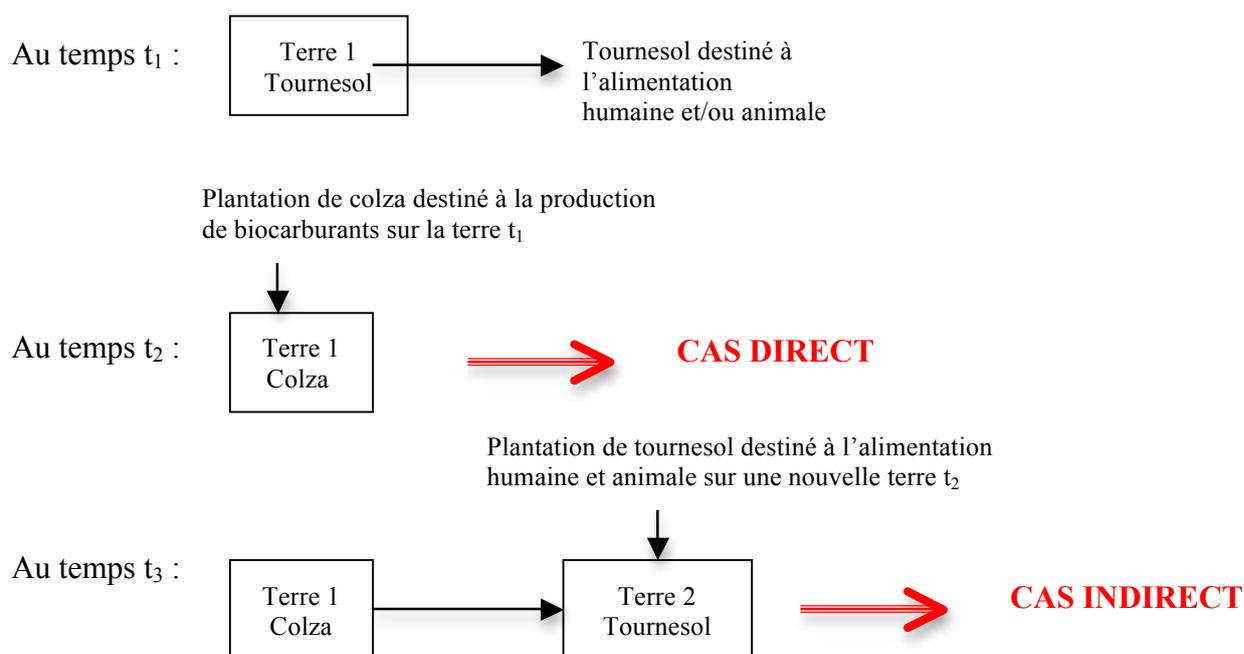


Figure 2. Schématisation simplifiée du phénomène des CAS : un exemple de distinction CAS direct et indirect

Une seconde approche utilisée par l'IFPRI (Laborde, 2011) est de mesurer la balance globale nette des émissions. Ceci est justifié de la façon suivante :

- 1- A l'heure actuelle, il n'y a pas de schéma permettant une traçabilité de la matière première depuis le lieu de production de la biomasse jusqu'à la localisation de la consommation finale du biocarburant²¹.
- 2- Bien qu'il soit utile de distinguer les CASd des CASi, cela ne change pas la balance nette globale des émissions. C'est cette balance nette globale qui nous intéresse et qui sera ainsi calculée lors des simulations dans un cadre d'analyse en équilibre général calculable.
- 3- De plus, sous l'hypothèse de la législation européenne, l'effet direct des CAS est nul (i.e., il prend en compte les critères de durabilité), ce qui revient à obtenir un facteur CAS équivalent aux CASi (équation 2) :

$$\text{FacteurCAS}_{global} = \text{CASd} + \text{CASi}(1)$$

$$\text{FacteurCAS}_{global} = 0 + \text{CASi}(2)$$

Comment les émissions sont calculées en pratique dans le modèle ?

Bien que ce rapport se concentre sur les aspects méthodologiques de l'introduction du secteur des biocarburants de seconde génération, l'intérêt de notre analyse est de nous permettre de calculer le facteur CAS pour les biocarburants de seconde génération au cours d'études ultérieures.

²¹ Le « Mass balance system » ou méthode du bilan massique a été proposé par la Commission européenne en 2011 dans le cadre de la RED (2009). C'est un récent système permettant d'obtenir une certaine traçabilité de la localisation de la production de la biomasse destinée à la production de biocarburants jusqu'à leur consommation (European Commission, 2011). L'objectif est de démontrer la durabilité des biocarburants produits par les parties prenantes tout au long de la chaîne d'offre. Cette méthode est toujours en cours de discussion en 2012.

Le facteur CAS (*LUC Factor* en anglais) correspond aux émissions associées aux changements d'allocation des sols qui sont annualisées sur une période d'amortissement (ici 20 ans, correspondant la durée fixée dans la législation européennes) plus les émissions issues des variations du stock de carbone dans les sols (si données séparément). Ces émissions sont ensuite rapportées à l'unité en énergie produite de biocarburants. **Le facteur CAS est mesuré en gCO₂eq/MJ.** (Cara et al., 2012)

On mesure d'abord l'impact du développement des biocarburants sur les CAS en ha/MJ. Le facteur CAS est calculé à partir de coefficients de stock de carbone (exogènes, appelés aussi facteur de conversion de GES) par type de terre et par zones agro-écologique²² (AEZ) en tCO₂/ha.

Après avoir présenté les notions concernant les changements d'allocation des sols, nous dressons le contexte sectoriel et politique des biocarburants de seconde génération en Union Européenne et aux Etats-Unis.

1.5. Les projets pilotes de production de biocarburants de seconde génération

Le secteur des biocarburants de seconde génération est en pleine « révélation ». Aucune technologie n'étant mise au point et finalisées pour une étape de commercialisation à grande échelle, de nombreux projets pilotes émergent (Tableau 2 et Tableau 3), multipliant les types de biocarburants de seconde génération potentiels et le type de matières premières pouvant être utilisés pour les produire (cf. Annexes I et II).

Tableau 2. Exemples de projets pilotes aux Etats-Unis, biocarburants de seconde génération

Nom du projet/Usine	Pays/régions	Subvention, fonds	Biomasse/biocarburants
KiOR ²³	Columbus, Mississippi.	\$222 million d'équipements.	Essence ou gazole standard à partir de bois, principalement « southern yellow pine trees ».
Poet ²⁴	Emmetsburg, Iowa.	A un partenariat commercial avec la compagnie Royal DSM (Pays Bas).	Destiné à produire de l'éthanol cellulosique.
Abengoa ²⁵	Hugoton, Kansas (la construction de l'usine a commencé en Juillet 2011 et son lancement est attendu en Juin 2013).	Le département américain de l'énergie (US. DoE) : prêt de \$134 million.	Corn stover (80%), Switchgrass (7%), etc... destinés à la production d'éthanol cellulosique.

²² Dans la base de données GTAP-AEZ, il y a 18 AEZ couvrant 6 périodes de croissance différentes et 3 zones climatiques (tropicale, tempérée et boréale). Hertel et al. (2005).

²³ <http://climate-connections.org/2012/06/06/clean-technology-us-policy-aids-second-generation-biofuel-push/>, Consulté le 13 Juillet 2012.

²⁴ <http://climate-connections.org/2012/06/06/clean-technology-us-policy-aids-second-generation-biofuel-push/>, Consulté le 13 juillet 2012.

²⁵ <http://www.bizjournals.com/wichita/news/2011/08/19/abengoa-cellulosic-ethanol-Hugoton.html>, Consulté le 13 Juillet 2012.

Ineos, Bio ²⁶	Indian River County, Florida (Vera Beach Site).	\$130 million d'équipements.	Déchets ménagers, résidus agricoles.
---------------------------------	---	------------------------------	--------------------------------------

Tableau 3. Exemples de projets pilotes en Union européenne, biocarburants de seconde génération

Nom du projet/Usine	Pays/régions	Subvention, fonds	Biomasse/ biocarburants
Crescentino ²⁷	Italie.	250 euros investissements (partenariat commercial).	Production d'éthanol cellulosique à partir de giant reed, arunda donax (bambou), paille de blé, résidus de maïs.
Chemrec ²⁸	Suède.		Développement et commercialisation de la technologie de gazéification pour la liqueur noire (coproduit en papeteries).
Abengoa ²⁹	Salamanca, Espagne.	U.S DoE : \$75 million.	Technologie d'hydrolyse enzymatique (voie biochimique) pour produire de l'éthanol cellulosique à partir de pailles de blé et d'orge.
BornBioFuel ³⁰	Danemark.	Subventions reçues: 15,9 million d'euros (construction de l'usine, intégration de la technologie et développement).	Conversion de résidus agricoles tels que les pailles, les déchets jardiniers les cultures énergétiques dédiées pour la production d'éthanol cellulosique.

Dans ce rapport, sont analysées deux voies de transformations : **biochimique** (ou enzymatique) et **thermochimique** (gazéification)³¹ convertissant un seul input « le Miscanthus » en biocarburant de seconde génération.

1.6. Les politiques publiques en faveur des biocarburants de seconde génération : UE et EU

Dans quelles mesures ces politiques encouragent-elles la production et la consommation de biocarburants cellulosiques ? Dans quelles mesures ces politiques prennent-elles en compte la question des changements d'allocation des sols ?

“There are some similarities and many differences between the US and EU approaches to stimulating the production and use of biofuels” (Tyner, 2010a)

²⁶ http://www.ineos.com/new_item.php?id_press=283

Consulté le 13 Juillet 2012.

²⁷ <http://climate-connections.org/2012/06/06/clean-technology-us-policy-aids-second-generation-biofuel-push/>, consulté le 13 Juillet 2012.

²⁸ <http://www.chemrec.se/Press-Chemrec.aspx>, consulté le 13 Juillet

²⁹ <http://www.crao.org/workshops/LCA%20October%202009/Session%205/1-2%20Adams,%20Kevin.pdf>, consulté le 13 Juillet 2012.

³⁰ <http://www.biogasol.com/BornBioFuel-177.aspx>, consulté le 13 Juillet 2012

³¹ Ces deux voies de conversion sont détaillées en annexe II. L'autre processus de conversion par la voie thermochimique est la « pyrolyse » (cf. Annexe II).

1.6.1 Les politiques publiques d'aide aux biocarburants de seconde génération

Les principales politiques publiques en faveur des biocarburants de seconde génération sont la taxe d'exemption (*tax credit*) et le mandat d'incorporation des biocarburants dans les transports (*blend mandate*).

Le mandat d'incorporation des biocarburants aux Etats-Unis

Le mandat américain est exprimé en volume, les Etats-Unis doivent atteindre la cible de 136,3 milliards de litres de biocarburants (1^{er} et 2^{ème} génération) d'ici à 2022. Ce mandat est départagé par types de biocarburants: les biocarburants conventionnels (56,8 milliards de litres peuvent provenir de l'éthanol produit à partir du maïs et 3,8 milliards du biodiesel), les biocarburants cellulósiques, les autres biocarburants dits « avancés » et le *biomass-based diesel (BBD)*. Ces trois dernières catégories doivent être produites à hauteur de 75,7 milliards de litres (EPA, 2010). Les biocarburants conventionnels sont produits à partir de la partie de la plante comestible (maïs) ; les biocarburants cellulósiques sont fabriqués à partir de matières premières cellulósiques, les autres biocarburants « avancés » sont produits à partir de sucre de canne, d'algues et de matériaux cellulósiques. Enfin, le biodiesel provient d'oléagineux, principalement le soja aux Etats-Unis (les Figure 3 et Figure 4 représentent ce partage dans l'U.S. RFS en 2022).

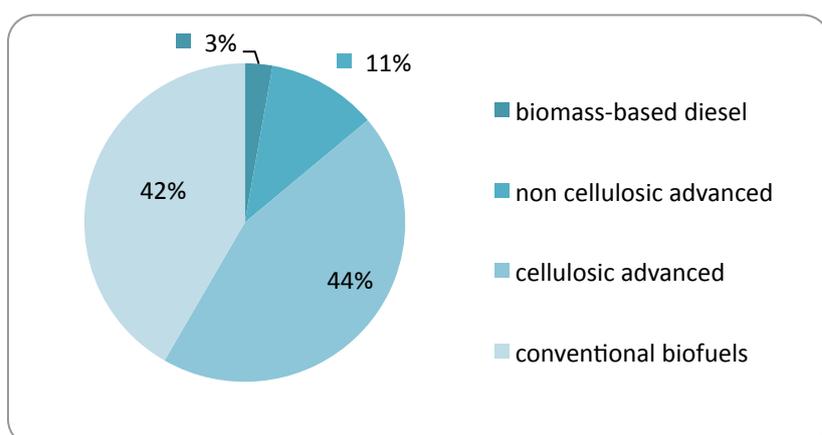


Figure 3. Partage par type de biocarburants dans le Renewable Fuel Standard (RFS, U.S.) en 2022.

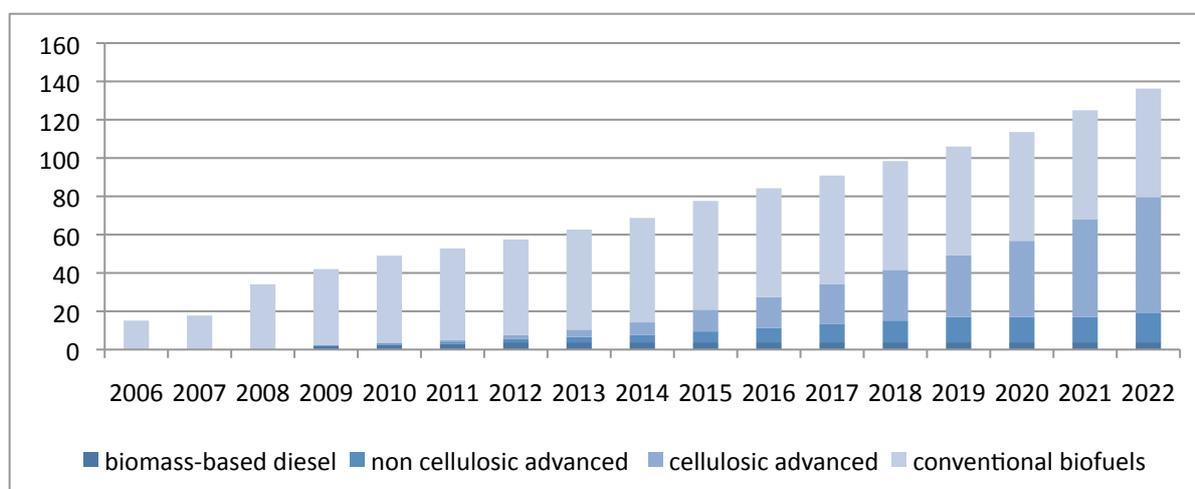


Figure 4. Mandat d'incorporation des biocarburants dans l'U.S. RFS d'ici 2022 (en milliards de litres).³²

³² Source: Tyner (2010).

Bien que le mandat garantit un marché pour les biocarburants de seconde génération (grâce au système des Renewable Identification Number –RIN-³³), il est possible de retarder ou de supprimer le mandat pour une année particulière, pour l'éthanol cellulosique, si ce mandat s'avère avoir des impacts adverses économiques ou environnementaux ou si simplement le niveau ne peut simplement pas être atteint (Eggert, Greaker, & Potter, 2011). Le mandat d'incorporation d'éthanol cellulosique a en effet été abaissé aux EU, en Mars 2010, ramenant la production à atteindre initialement de 100 millions de gallons à 6,5 millions de gallons. A nouveau, en Novembre 2011, l'EPA abaisse le niveau du mandat d'incorporation de l'éthanol de seconde génération de 250 millions de gallons initialement à 6 millions de gallons. L'EISA (*the US Energy Independance and Security Act of 2007*) spécifie que l'EPA a l'autorité pour abaisser le niveau du mandat pour les biocarburants cellulosiques si la capacité d'atteindre ce mandat pour les producteurs/importateurs n'est pas réalisable (*Section 202 of EISA*).

Le mandat d'incorporation des biocarburants en Union Européenne³⁴

La directive "Energie Renouvelable" (Directive 2009/28/CE, RED) souligne la nécessité « d'assurer la disponibilité commerciale des biocarburants de seconde génération ». En plus de l'obligation d'atteindre la **cible de 10% d'énergies renouvelables dans les transports à l'horizon 2020**, la contribution des biocarburants produits à partir de biomasse non comestible (déchets notamment) et de matériaux ligno-cellulosiques **seront comptés doubles dans la cible d'incorporation fixée par l'UE** comparés aux biocarburants de première génération. Contrairement à la législation des EU où le mandat d'incorporation est volumétrique, celui de l'UE est établi par rapport au contenu énergétique des carburants liquides. De plus, la Directive ne spécifie aucun quota pour cette nouvelle génération de biocarburants et n'établit pas de différenciation par type de matériaux comme dans le U.S. RFS (végétaux comestibles, cellulosiques, ligno-cellulosique).

Chaque Etat membre a établi, en 2010, une feuille de route détaillant la manière dont il souhaite atteindre la cible des 10% en 2020 (cibles sectorielles, choix technologiques, etc.). Cette feuille de route est plus communément appelée plans d'actions nationaux "énergies renouvelables" (NREAPs). La Figure 5 représente les niveaux estimés en *Kton oil equivalent* (Ktoe ou Ktonne équivalent pétrole –ktep-) de consommation de biocarburants de première et deuxième génération issus des 27 NREAPs³⁵.

³³ Cf. Annexe III.

³⁴ Pour l'Union européenne, nous utiliserons le terme de mandat pour mieux comprendre la correspondance avec le mandat américain. Cependant, dans la formulation employée par la RED le terme plus adéquat pour l'instrument politique d'obligation d'incorporation des biocarburants est « cible » (ou *target* en anglais). Les autres politiques publiques reliées à l'incitation à la production et à la consommation de biocarburants en Union Européennes sont décrites en annexe IV.

³⁵ http://ec.europa.eu/energy/renewables/action_plan_en.htm, consulté le 03 Juillet 2012.

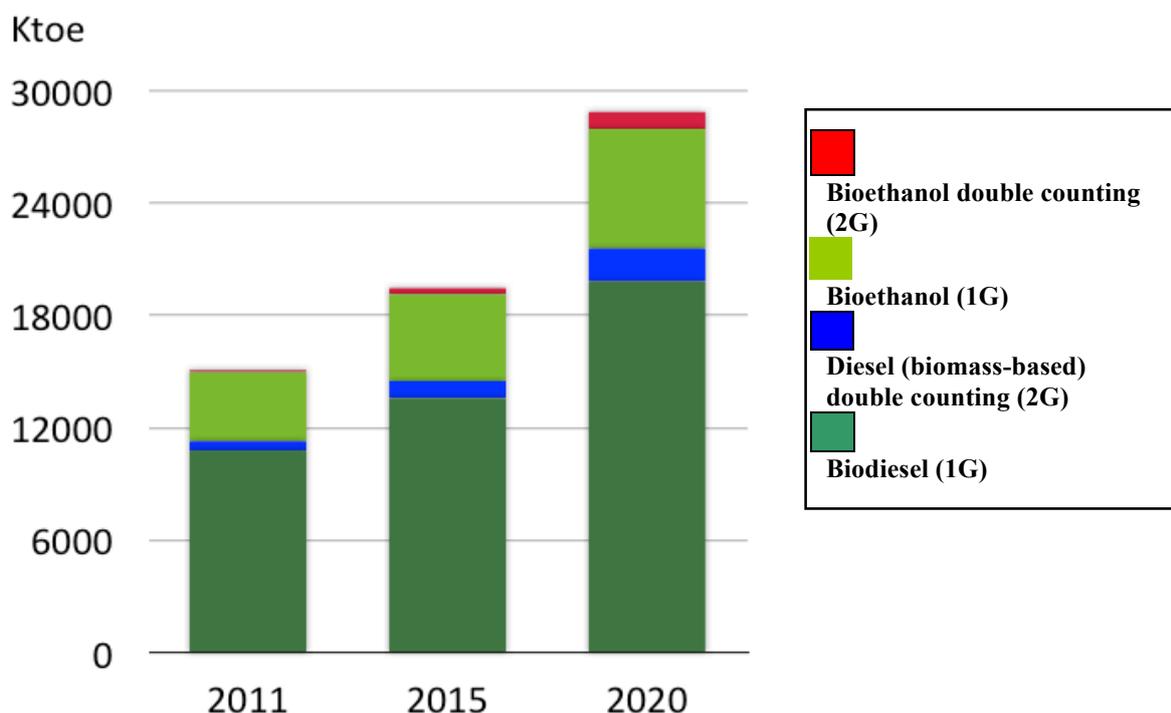


Figure 5. Estimation (NREAPs) du rôle des biocarburants de seconde génération d'ici 2020.³⁶

1.6.2 Le contexte réglementaire des CAS liés à la production de biocarburants

Un enjeu essentiel pour chaque gouvernement est d'apporter la preuve que chaque type de biocarburant génère moins de GES que les carburants fossiles afin de rendre légitime l'objectif environnemental d'une politique publique. Pour cela, les Etats-Unis et l'Union Européenne ont mis en place un contexte réglementaire spécifique et actuellement au cœur d'une polémique sous tension.

Aux Etats-Unis

La loi américaine établit un seuil de réduction des GES qui doit être atteint pour chaque catégorie de biocarburants. Pour les biocarburants de type conventionnels (à partir de maïs), ce seuil est de 20%, pour ceux de type cellulosique, il est de 60%, pour les autres catégories, il est de 50%. L'Environmental Protection Agency (EPA) a l'autorité de réviser ce seuil jusqu'à 10%. La législation statue que les émissions de GES directes et indirectes doivent être incluses. Autrement dit, les émissions associées aux CAS induits par l'augmentation de la demande de biocarburants doivent être incluses dans le calcul. Ainsi tout carburant n'atteignant pas ce seuil ne peut être inclus dans le Renewable Fuel Standard (RFS). Ce contexte réglementaire incite les usines de production de biocarburants (en construction ou au stade de commercialisation) à respecter les critères de durabilité requis. L'organisme chargé d'approuver le respect des critères pour chaque type de biocarburants est l'EPA au niveau national (avec une exception pour la Californie où le California Air Resource Board (CARB) est l'instance rattachée à l'Etat de Californie qui certifie les biocarburants selon les critères de durabilité).

³⁶ Source: Rob Vierhout, Plenary Meeting, Brussels, Sept. 2011.

En Union Européenne

Au niveau européen, la directive « énergie renouvelable » (RED, 2009) définit les critères de durabilité, notamment le seuil minimal de réduction des GES qui doit être atteint. Les biocarburants doivent en effet réduire d'au moins 35% les GES comparés aux carburants fossiles depuis 2010. Ce seuil sera relevé à 45% en 2013, 50% en 2017 et 60% en 2018 pour les nouvelles installations.

De plus, la directive « qualité des carburants » (FQD, 2009) renforce et confirme ces critères en fixant un objectif de réduction des GES sur l'ensemble du cycle de vie de 10% par unité d'énergie de carburant utilisée en 2020 (par rapport à l'année 2010).

En ce qui concerne l'utilisation des sols, certains types de terre sont non éligibles à la mise en place des cultures destinées aux biocarburants (forêts primaires, aires protégées, prairies ayant une riche biodiversité, zone humides et tourbières).

Cependant, aucune clause légalement liée aux aspects de "changements d'affectation des sols indirects" ne fut gardée dans le texte final de la directive RED. Au courant de l'année 2012, Bruxelles devrait communiquer une proposition visant à évaluer les effets indirects des émissions issues des biocarburants. Selon la source Euractiv³⁷ (Avril 2012), cette proposition viserait à distinguer les biocarburants faibles en carbone, et ceux fortement émetteurs, comme le biodiesel.

«Le processus décisionnel de l'UE est toutefois paralysé par un conflit permanent entre la DG Energie, qui ne souhaite pas inclure de facteurs liés au changement d'affectation des sols indirects (CASI), et la DG climat, qui est d'avis contraire. L'introduction de facteurs CASI condamnerait toutefois certainement les biodiesels conventionnels très polluants, soit la majorité de la production européenne de biocarburants. Cela provoquerait un tollé politique dans certains Etats européens comme la France et l'Allemagne et pourrait ébranler le compromis qui avait permis l'adoption de la directive sur les énergies renouvelables.»³⁸

Ce contexte réglementaire met en évidence que la question des CASi pour les biocarburants de seconde génération constitue un enjeu politique et sectoriel fort. Dans la partie suivante, nous présentons les caractéristiques agronomique et énergétique de cette biomasse ainsi que la structure des coûts pour les deux biocarburants produits à partir du Miscanthus. Les spécificités biophysiques du Miscanthus doivent être nuancées par ses potentialités économiques en UE.

³⁷ Euractiv est le site d'information de l'Union Européenne.

³⁸ <http://www.euractiv.fr/durabilite-biocarburants-remise-question-rapport-article>, consulté le 12 Juillet 2012.

PARTIE II Caractéristiques du Miscanthus : une culture dédiée aux biocarburants « seconde génération »

Le Miscanthus a prédominé en Europe dès les années 80 comme matière première potentielle pour la production de biocarburant en raison de son fort potentiel en biomasse³⁹. De 2011 à 2012, cinq projets de mise en culture du Miscanthus destinés à la production de biocarburants et de bioénergies ont été établis par le U.S. Department of Agriculture (USDA) sur 42 'counties'⁴⁰. En Europe, le Miscanthus est actuellement cultivé commercialement (en proportion mineure en Europe du Nord) destiné à la combustion directe pour produire de la chaleur (notamment en Allemagne, près d'Hirschau⁴¹) (Long, Heaton, Clifton-Brown, Voigt, & Michael, (2003); Grignon & Positive, p 15 (2008)). Dans cette partie, nous décrivons les caractéristiques de cette biomasse destinée à la production de bioénergies.

II.1. Caractéristiques agronomiques et énergétiques

1. Spécificités agronomiques

Dans ce rapport, « Miscanthus » fera référence à l'espèce hybride « Miscanthus & Giganteus ». Ce génotype est caractérisé par sa forte productivité de biomasse et a un cycle de vie de 10 ans pendant lesquels les rendements augmentent durant les deux premières années jusqu'à atteindre un niveau maximal la troisième année. Ce dernier se stabilise à cette valeur durant les années suivantes (Figure 6).

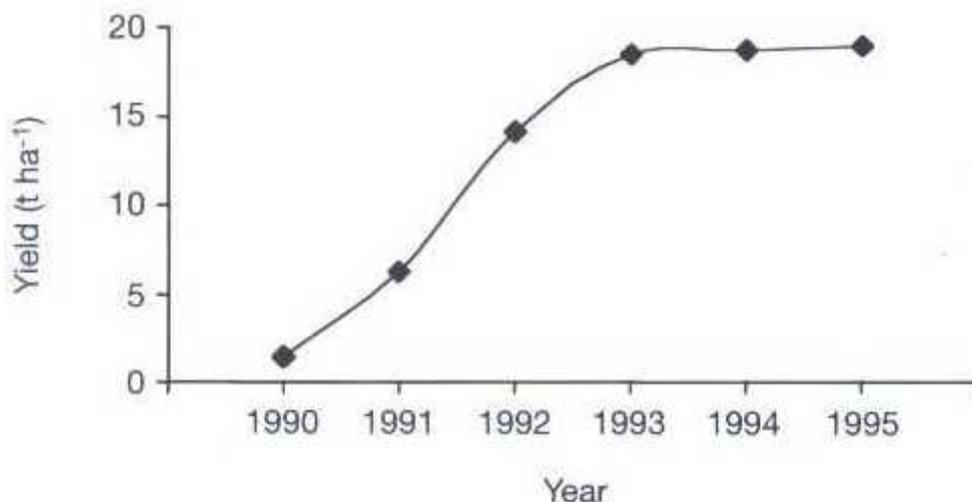


Figure 6. Rendement du Miscanthus sur six années.⁴²

Cette culture pérenne croît à partir d'un rhizome (tige souterraine). La récolte de la biomasse aérienne a lieu chaque année. La phase de plantation des rhizomes requiert un matériel et un savoir-faire spécifiques (la mise en place des rhizomes est délicate et détermine les futurs

³⁹ La variété concernée par ce fort potentiel en ligno-cellulose est le Miscanthus & Giganteus.

⁴⁰ Un *county* ou comté aux Etats Unis correspond à un échelon administratif au-dessous de l'Etat, et à une subdivision géographique d'un Etat.

⁴¹ La société OKO THERM, fondée en 1988, commercialise des chaudières à Miscanthus en Europe du Nord.

<http://www.oeko-therm.net>, consulté le 28 Juillet 2012.

⁴² Source: John et Walsh, 2001.

rendements)⁴³. Cependant, la récolte (après le deuxième hiver) peut se réaliser avec le même matériel que pour les cultures céréalières. De plus, cette culture ne requiert pas de fertilisation azotée après la première année et du fait de sa densité de feuillage, augmente la pression sur les adventices réduisant de ce fait la quantité d’herbicide utilisée. Le Miscanthus & Giganteus est l’une des rares cultures pérennes à rhizome à être très tolérante au froid, devenant ainsi une espèce bien adaptée aux climats tempérés (Heaton et al., 2010).

2. Spécificités énergétiques

Le fort potentiel du Miscanthus pour la production d’énergie est dû à sa concentration élevée de trois molécules : la lignine, la cellulose et l’hémicellulose (Tableau 4). Cette composition affectera l’efficacité énergétique du processus de transformation. L’hémicellulose et la cellulose seront privilégiées par la voie de conversion biochimique alors que la voie thermochimique utilise la partie lignique du végétal (Bracmort, Schnepf, Stubbs, & Yacobucci, 2011).

Tableau 4. Composants ligno-cellulosiques de différents matériaux.⁴⁴

	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignine (%)
Miscanthus	43	24	19
Switchgrass	37	29	19
Corn Stover	38	26	19
Wheat Straw	38	29	15

Cette matière est actuellement convoitée et très étudiée en Europe⁴⁵ (ayant un parc automobile principalement orienté diesel) pour son potentiel d’utilisation via la voie thermochimique (Fischer-Tropsch Diesel) permettant de produire du diesel cellulosique.

3. Variabilité du rendement du Miscanthus

Richter et al. (2008) ont identifié six variables affectant significativement le rendement du Miscanthus :

- nombre d’années après plantation,
- longueur des saisons ($T_{\text{air}} > 9^{\circ}\text{C}$),
- température,
- radiation solaire globale,

⁴³ En Europe, il y a une certaine faiblesse des connaissances et des références techniques sur les cultures énergétiques dédiées (INRA Lille :

http://www.lille.inra.fr/lille/science_pour_tous/dossiers_thematiques/miscanthus_un_encouragement_pour_les_bioenergies/projet_pel_picardie_especes_ligno_cellulosiques). Le projet de l’INRA de Lille « Picardie Espèces Ligno-cellulosiques », créé en 2007, essaye de mettre en place des innovations variétales adaptées à l’Europe du Nord et à un usage en bio-énergie). L’Université de Hohenheim en Allemagne est le coordinateur d’un autre projet OPTIMISC 2011-2016 (Optimizing Miscanthus Biomass Production) appartenant au Seventh Framework Programme (FP7) de l’UE.

⁴⁴ Source: North Central Sun Grant Center, Composition of Herbaceous Biomass Feedstocks, Sun Grant Initiative—North Central Center, South Dakota State University (Brookings, SD), June 2007

⁴⁵ En France, la société Novabiom (<http://www.novabiom.com/>) développe les nouvelles biomasses végétales et en promeut l’usage : en particulier le Miscanthus (dans un objectif de production de bioénergie avec le partenariat ANR bioénergie « Gameco »).

- précipitation et potentiel d'évapotranspiration durant la saison,
- capacité de rétention d'eau d'un sol.

Heaton et al. (2010) ont reporté, dans une récente publication, les rendements du Miscanthus estimés dans la littérature entre 1995 et 2010. Les valeurs se répartissent entre 5 et 55 dt/ha (dry ton -tonnes de matières sèches- par hectare) pour l'Union européenne et pour les Etats-Unis. Sur l'ensemble de ces deux zones (EU et UE), 73% des valeurs se concentrent entre 10 et 30 dt/ha. Ces grandes amplitudes de rendements s'expliquent par les différences de conditions expérimentales, notamment, la zone géographique, les conditions d'irrigation, les traitements en fertilisants ainsi que les variétés génétiques sélectionnées (Heaton et al., 2010).

Si ces caractéristiques tant énergétiques qu'agronomiques en font une culture très intéressante pour répondre à l'enjeu énergétique des biocarburants, il convient de se demander quelle est la viabilité économique d'une telle culture en Europe (Encart 1) et sur quelles terres le Miscanthus peut être cultivé (cf. partie suivante). Les terres arables habituellement destinées à des cultures alimentaires pourraient subir une pression supplémentaire si elles sont aussi utilisées pour les cultures énergétiques telles que le Miscanthus; les alternatives sont les choix de terres destinées au pâturage des troupeaux, de terres en friches, dégradées ou marginales.

Deux pierres d'achoppement entravent actuellement la viabilité économique de la culture du Miscanthus en Europe : **le coût du transport/stockage et le coût de conversion** (Grignon, 2008). Etant donné la faible densité du produit, et malgré les techniques d'ensilage, de bottelage et de broyage mises au point, les volumes de stockage sont importants, donc le transport n'est viable économiquement que sur de courtes distances.

Il faut cependant noter que la combustion directe du Miscanthus pourrait bien rester encore un moment le marché immédiat majeur pour cette culture, car la conversion reste très onéreuse (Mailhes, 2007).

Viabilité économique au niveau « producteur » : Les producteurs ne vont décider de mettre en place des cultures énergétiques que si elles leur assurent un revenu au moins égal à celui d'une culture plus classique (blé, maïs). **C'est la raison pour laquelle il serait intéressant de comparer les coûts de production sur les mêmes hypothèses de production.**

Viabilité économique au niveau « consommateur » : Si on fait l'hypothèse qu'un MWh ou un gallon de biocarburant issu de cultures énergétiques est équivalent à un MWh/gallon de combustible fossile classique, et que le choix d'un consommateur se porte uniquement sur le prix ; alors les cultures énergétiques pourront être considérées comme compétitives par rapport aux combustibles fossiles si le consommateur peut se procurer du MWh/gallon de culture énergétique coûtant au maximum le prix d'un combustible classique.

D'après le rapport de la ferme expérimentale d'AgroParisTech sur la production de Miscanthus (2008), les cultures énergétiques sont dans la plupart des cas compétitives par rapport aux combustibles fossiles. Le coût de production du MWh issu de cultures énergétiques est, dans la majorité des situations, inférieur au coût de production du MWh d'énergie fossile. Ainsi, en première analyse, les cultures énergétiques peuvent se classer par ordre d'intérêt économique décroissant : Miscanthus puis taillis à courte rotation (TCR) de Saule. Dans tous les cas de figure, le Miscanthus apparaît plus intéressant que le fioul et le gaz, et plus compétitif que d'autres cultures énergétiques telles que le TCR de Saule, le Phalaris (Alpiste faux-roseau) et le Panic érigé. Néanmoins, les conclusions de cette analyse devraient être nuancées par la prise en compte des surcoûts qu'impliqueraient l'aménagement et l'exploitation d'un réseau de chaleur à biomasse et des données peu récentes (datant de 4 ans) qui sont à prendre avec précaution.

II.2. Productivité des sols et substitution des terres

Le Miscanthus n'est pas une culture alimentaire contrairement au maïs, au colza ou à la canne à sucre, trois cultures utilisées pour la production de biocarburants de première génération et créant de ce fait une pression sur les terres destinées à l'alimentation humaine et animale. Son développement pourrait-il venir relâcher la contrainte sur la ressource en terre ?

Nombreux sont ceux qui affirment que le Miscanthus serait adapté pour être cultivé sur des terres marginales (Campbell, 2012; Carroll & Somerville, 2009) et ainsi éviterait le problème de concurrence avec les terres agricoles. Certes, mais qu'entend-on par terre « marginale » ?

a- Concept de terres marginales

Le concept de terres « marginales » semble peu délimité et ses définitions diffèrent selon les gouvernements et les institutions (Tableau 5).

Tableau 5. Définition du concept de terres « marginales » (adapté de Tang et al, 2010).

	Définitions	Sources
Définition 1	Land used for growing energy crops as wasteland and paddy (riziere) land fallowed in winter.	The Chinese Ministry of Agriculture. http://www.caas.net.cn/jijian/UploadFiles/2008313104948159.doc . consulté le 9 Juillet 2012
Définition 2	Land of poor quality with regard to agricultural use, and unsuitable for housing and other uses.	OECD stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=1591 Consulté le 9 Juillet 2012
Définition 3	Low quality land the value of whose production barely covers its cultivation costs	European Environmental Agency (EEA) www.eionet.europa.eu/gemet/concept?ns=1&cp=5023 Consulté le 9 Juillet 2012
Définition 4	‘other land’ is land that is neither forest or agriculture, including built-up and related land, barren land and other wooded land, etc.	FAO does not give a direct definition of marginal land but distinguishes two types of land: Agricultural land (the sum of arable land (land under temporary cultivation), permanent crops, and permanent meadows and pasture); and other land. faostat.fao.org/site/375/default.aspx Consulté le 9 Juillet 2012

Ces définitions semblent converger vers un point commun : des terres de mauvaise qualité pour une utilisation par le secteur agricole. Par ailleurs, une étude a montré que le *Miscanthus* cultivé sur des terres marginales aurait des rendements significativement plus bas que s’il était cultivé sur des terres arables initialement utilisées par le secteur agricole (Bauen et al., 2010).

Si ces définitions sous-entendent implicitement que les terres marginales n’entreraient pas en compétition avec les terres destinées aux cultures alimentaires (humaine ou animale), un récent article souligne que ce n’est pas toujours le cas à partir de l’exemple de l’Amérique Centrale.

*“Central American governments and interest groups specify that biofuel expansion will occur on “tierras ociosas”—or vacant, unproductive land. [...] A reported 3,000 indigenous people in the Valle de Polochic of Guatemala were displaced in January 2012 by an ethanol company, Chabil Utzaj, supported by the government. Corn, yucca, and bean crops were destroyed to make way for sugarcane feedstock. Source: Comité de Unidad Campesino”*⁴⁶ (A. Goldstein, July 2012).

Bien que l’USDA ne définit pas explicitement ce concept, il définit les « terres éligibles » à la production de *Miscanthus* pour les biocarburants aux Etats-Unis, comme « *agricultural and non industrial private forestland, but does not include federal or state-owned land, land that is native sod, or land enrolled in the conservation Reserve program, Wetland program ou*

⁴⁶ <http://blogs.worldwatch.org/biofuel-expansion-in-central-america-and-the-myth-of-vacant-land/> consulté le 12 Juillet 2012.

Grassland Reserve Program »⁴⁷.

Face à ces définitions mal délimitées, le développement des biocarburants de seconde génération pourrait induire d'une part une substitution dans les usages de sols si la biomasse ligno-cellulosique est cultivée sur des terres agricoles ou des pâtures. D'autre part, ces cultures pérennes pourraient aussi être plantées sur de nouvelles terres « en friches ou marginales ».

b- Les usages des sols : Substitution et expansion

Un accroissement des surfaces par substitution a lieu lorsque la hausse des surfaces s'effectue au dépend des autres cultures ou en détournant l'usage de la biomasse produite, il s'agit alors d'une **substitution d'usage** (Cara et al., 2012). Face à plusieurs cultures possibles sur une surface donnée, l'agriculteur va chercher à produire prioritairement la culture qui lui apportera la plus grande rentabilité de sa terre. Le paramètre clé en termes de modélisation est **l'élasticité de l'offre de terre pour une culture donnée par rapport à la rentabilité de la terre** associée à cette culture (aussi appelée élasticité prix directe). Ainsi, la substitution d'une culture par une culture destinée à produire des biocarburants correspond à un changement d'allocation des sols directs (CASd).

L'accroissement des surfaces par expansion des surfaces cultivées intervient quant à lui lorsque de nouvelles terres (non cultivées) sont mises en culture. **Il s'agit alors d'un accroissement de la surface cultivée au dépend d'autres usages tels que les forêts, les friches ou les pâturages.** Le paramètre clé intervenant dans les modèles est, ici, l'élasticité d'offre de terre par rapport aux prix et l'offre finale de terre cultivée peut alors être supérieure à la surface initiale (de Cara et al., 2012). Deux types d'expansion peuvent être distingués : lorsque l'accroissement de surface est destiné à mettre en place une culture pour les biocarburants, il s'agit d'un CAS direct. Il peut aussi s'agir d'un déplacement de culture consécutif à une substitution et il faut alors produire la culture initiale ailleurs, il s'agit alors d'un CAS indirect. Dans le cas d'une expansion des surfaces cultivées, une hypothèse sur le rendement des nouvelles terres mises en culture doit être formulée. On parle alors de rendement marginal des nouvelles terres par rapport aux terres déjà cultivées. **Ce rapport devra être distingué des effets d'élasticité de transformation dans les exercices de calibrages ultérieurs du modèle.** Les hypothèses choisies sur les rendements du Miscanthus selon le type de terre sont, de plus, détaillées dans la section suivante.

Ces deux concepts (expansion et substitution) sont approfondis en partie III, nous y rappelons notamment la littérature existante sur l'impact de l'introduction des cultures énergétiques dédiées sur les CAS. Nous développons également la méthodologie adoptée pour modifier le modèle sur le mécanisme de réallocation de la terre d'une part et la technologie de transformation d'autre part lors de l'introduction des biocarburants de seconde génération.

c- Méthodologie de modélisation des rendements du Miscanthus sur trois types de sols

Dans le modèle MIRAGE-BioF, les rendements sont endogènes, i.e. ils s'ajustent chaque année aux conditions de prix des inputs (fertilisants notamment) et aux conditions d'expansion des terres. Différencier les rendements de la culture du Miscanthus sur différents

⁴⁷http://www.fsa.usda.gov/FSA/newsReleases?area=newsroom&subject=landing&topic=pfs&newstype=prfactsh&type=detail&item=pf_20110503_energ_en_bcap1.html, consulté le 9 Juillet 2012.

types de terre est ainsi d'une grande importance et peut être la source d'une incertitude élevée. Tenant compte de la différence dans les qualités nutritionnelles de plusieurs types de terres, nous nous attendons à des rendements décroissants du Miscanthus cultivés respectivement sur une terre agricole, puis sur une terre initialement en pâture et enfin sur une terre « marginale ». Plus de terres seront alors nécessaires selon que l'on cultive du Miscanthus sur une terre en pâture ou sur une terre marginale plutôt que sur une terre initialement destinée à la production de cultures alimentaires (animale ou humaine).

Pour modéliser cette évolution des rendements en fonction du type de terre, une méthodologie a été mise en place par le Joint Research Center (JRC)⁴⁸. Nous nous appuyons sur cette dernière pour définir les hypothèses de rendement du Miscanthus lors de sa culture sur de nouvelles terres (cultivées, pâtures, terres dégradées).

1- Rendement du Miscanthus cultivé sur des terres céréalieres (cropland)

La majorité des données sur les rendements du Miscanthus apportées par la littérature s'étalent entre 10 et 30 tonnes de matières sèches par hectare aux EU et en UE⁴⁹. Cet intervalle de valeurs, obtenus expérimentalement, est considéré trop élevé par le JRC. En effet, dû à un manque d'expérience dans la culture commerciale du Miscanthus dans la grande majorité des pays européens, aucune donnée statistique sur les rendements n'est disponible. Les rendements obtenus en champs expérimentaux ne devraient alors pas être extrapolés pour une application à l'échelle nationale ou locale : les rendements obtenus expérimentalement sont plus élevés que ceux des plantations commerciales en raison d'une meilleure gestion (par exemple, pas de limitation des rendements en eau) et à moins de gaspillage.

Un ratio de 1,57 tonne de matière sèche de cultures ligno-cellulosiques dédiées par tonne de céréales est utilisé dans notre projet. Ce ratio de rendement fût obtenu par le JRC (2007). Dans leur rapport, les ratios sont calculés sur la base d'une comparaison entre la production de Saule et de Blé au Royaume-Uni aussi bien que sur les données publiées par le Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg, 2006) lequel compare les rendements des taillis à courte rotation avec les rendements du blé en Bavière.

Les ratios de rendements disponibles dans la littérature scientifique sont proches de cette valeur. Mola-Yudego (2010) ont analysé la productivité de plantations de saules à courte rotation pour six pays européens nordiques (Danemark, Finlande, Estonie, Lettonie, Lituanie et Suède) et ont développé un modèle pour l'estimation des rendements du Saule basé sur la production d'avoine. Sur la base de leurs données un ratio de 1,46 est obtenu.

De plus, les données sur les rendements pour les cultures ligno-cellulosiques en Europe obtenues dans le projet 4F Crops Project (UNICT, 2011) et l'European Environment Agency (2007) ont été comparées par le JRC avec les rendements de céréales issus de la base de données FAOSTAT. Les ratios de rendements obtenus sont compris entre 1,38 et 1,77.

Le rendement de référence pour la céréale utilisée dans ce rapport est le rendement de la catégorie « céréale » disponible dans la base de données FAOSTAT). Ce rendement représente la moyenne de rendements en céréales atteignables pour une région donnée. Ce dernier s'établit à 5 tonnes de matières sèches par hectare (à partir des données 2009 et 2010). Ainsi le rendement moyen (des Etats membres de l'UE) du Miscanthus s'établit à **7,85 tonnes par hectare pour les terres agricoles.**

⁴⁸ Centre de recherche de la Commission Européenne.

⁴⁹ cf. Partie II.1.3 et Heaton et al., (2010).

2- Rendement du *Miscanthus* cultivé sur des pâtures (pasture land)

Nous utilisons **une réduction du rendement de 40% pour les cultures ligno-cellulosiques dédiées cultivées sur des terres à pâtures**. Cette réduction de 40% est obtenue sur les rendements moyens des cultures destinées à l'alimentation animale sur des pâtures de différents pays européens estimées dans le projet REFUEL (Fischer et al., 2007). Ces rendements estimés ont été comparés par le JRC avec les données FAOSTAT sur le rendement des céréales multiplié par le ratio suscité de 1,57 tonnes de matières sèches de cultures ligno-cellulosiques dédiées par tonne de céréales afin d'obtenir un rendement du *Miscanthus* sur les terres à pâtures.

Le rendement du *Miscanthus* sur les pâtures s'établit en moyenne (dans les Etats membres de l'UE) à 4,71 tonnes de matières sèches par hectare.

3- Rendement du *Miscanthus* cultivé sur des terres marginales (marginal/degraded land)

Pour la réduction du rendement sur des terres marginales, nous utilisons les données issues de Nijssen, et al. (2012). La définition des terres « dégradées » utilisée par Nijssen et al. s'appuie sur la définition d'Oldeman & Al., (1990) : *“A region where the balance between the attacking forces of climate and the natural resistance of the terrain against these forces has been broken by human intervention, resulting in a decreased current and/or future capacity of soil to support life”*.

Le Tableau 6 présente les surfaces en terres pour quatre degrés de dégradation. La surface dégradée totale représente 1.836 millions d'hectares pour laquelle l'érosion était le type de dégradation le plus fréquent, responsable de 87 % des terres dégradées. La dégradation chimique est responsable de 8% des terres dégradées alors que la dégradation physique (compaction, délavage, subsidence) était le type de dégradation le moins significatif affectant 5% des terres dégradées.

Tableau 6. GLASOD (Global Assessment of Degradation)⁵⁰ : définitions et données pour quatre degrés de dégradation.⁵¹

Degree	Description	Yield reduction of perennial crops on degraded lands	Area (Mha)
Light	The terrain is suitable for use in local farming systems, but has somewhat reduced agricultural suitability. Restoration to full productivity is possible by modifications of the management system. Original biotic functions are still largely intact.	9%	696,44
Moderate	The terrain is still suitable for use in local farming systems, but has greatly reduced agricultural productivity. Major improvements are required to restore productivity. Original biotic functions are partially destroyed.	24%	866,72
Strong	The terrain is non-reclaimable at farm level. Major engineering works are required for terrain restoration. Original biotic functions are largely destroyed.	57%	264,81
Extreme	The terrain is irreclaimable and beyond restoration. Original biotic functions are fully destroyed.	86%	8,54

Tyner, (2010b) utilisent une autre approche. Grâce à l'utilisation du modèle TEM « bio-process-based biogeochemistry model », le rendement des nouvelles terres peut être rendu variable par région du monde et par zone agro-écologique (AEZ). Selon leur article, cette approche permet de diminuer l'effet du LUC global dans le modèle GTAP car de nombreuses régions ont un rendement marginal supérieur à 0,66 (i.e. que la productivité d'une terre nouvellement convertie aura un rendement 34% plus faible que les terres actuellement cultivées). Ce chiffre varie de 0,89 à 1 pour le Brésil, compatible avec les recommandations de la Brazilian Sugarcane Industry Association (Nichols, 2009).

Afin d'ajuster le rendement du Miscanthus lorsqu'il est cultivé sur des terres ayant des usages initiaux différents dans les pays membres de l'Union européenne nous retiendrons les hypothèses suivante :

- un rendement moyen du Miscanthus à 7,85 tonnes par hectare pour les terres céréalières,
- une réduction de ce rendement de 40% lorsque le Miscanthus est cultivé sur des terres à pâtures,
- et pour les terres dégradées nous ajusterons les rendements aux réductions présentées dans le Tableau 6.

⁵⁰ The GLASOD database a été créée dans le cadre du projet GLASOD financé par l'UNEP. Le projet GLASOD a permis d'établir une carte mondiale de la dégradation des sols induite par l'homme utilisant une approche d'expertise. Les données ont été compilées en coopération avec un important nombre d'experts en science des sols à travers le monde, utilisant un guide uniforme et une homogénéité internationale. Disponible : <http://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod>, consulté le 31 Juillet 2012.

⁵¹ Source : Nijssen et al. (2012).

Dans la partie suivante, après avoir présenté l'ossature du modèle en équilibre général calculable MIRAGE-BioF, nous abordons deux points méthodologiques pour l'introduction des biocarburants de seconde génération (basés sur le Miscanthus) : l'allocation de la terre et la technologie de transformation.

PARTIE III MIRAGE-BioF : un modèle d'Équilibre General Calculable dédié aux biocarburants

III.1. Origine du modèle

Le modèle MIRAGE a d'abord été conçu par le Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales (CEPII, Paris) pour l'analyse des politiques commerciales en 2001 (cf. Decreux & Valin, 2007 pour une mise à jour de MIRAGE standard)⁵². En 2010, ce dernier a été modifié à l'IFPRI afin d'analyser le potentiel économique et les impacts environnementaux des politiques d'aides aux biocarburants⁵³. Les adaptations clés par rapport au modèle standard sont :

- l'intégration des deux principaux secteurs des biocarburants : éthanol et biodiesel,
- l'intégration des principaux secteurs de matières premières pour les biocarburants (feedstocks),
- des améliorations dans la modélisation du secteur de l'énergie,
- la modélisation des coproduits,
- la modélisation de l'utilisation des fertilisants.

Le module des changements d'allocation des terres (CAS) inclut :

- la décomposition de la terre en différentes utilisations,
- la quantification de l'impact environnemental des CAS.

Ce module a été intégré (Valin, Dimaranan, & Bouet, 2009) dans le modèle au niveau des zones agro-écologiques (AEZ), permettant une modélisation infranationale. Ce trait est particulièrement important pour les grands pays où les modes de production et la disponibilité des terres sont très hétérogènes.

L'architecture générale du modèle a été modifiée (Valin et al., 2009) pour permettre des analyses variées, notamment pour le calcul des CASi marginaux sous des hypothèses spécifiques.

Le modèle MIRAGE repose sur la base de données Global Trade Analysis Project (GTAP). Cette base de données combine des matrices input-output lesquelles fournissent des détails sur les liens intersectoriels dans chaque région et des jeux de données sur les agrégats macroéconomiques, le commerce bilatéral, les protections, et l'énergie. Dans cette première version de MIRAGE-BioF, la base de données utilisée était la dernière disponible i.e. GTAP 7. Cette dernière décrit l'activité économique mondiale pour l'année de référence 2004, dans un cadre d'agrégation de 113 régions et de 57 secteurs. La base de données a été alors modifiée⁵³ (Valin, 2009) pour être adaptée aux spécificités sectorielles des biocarburants. En effet, 23 nouveaux secteurs furent construits à partir des agrégats des secteurs de GTAP pour :

- Le produit fini des biocarburants : le secteur de l'éthanol avec 4 secteurs de matières premières spécifiques, et le secteur du biodiesel.
- Les inputs : les principaux secteurs de matières premières pour les biocarburants (Maïs, Colza, Soja, Tournesol, Palme et huiles associées)

⁵² Disponible : <http://www.cepii.fr/anglaisgraph/workpap/pdf/2007/wp07-15.pdf>, consulté le 31 Mai 2012.

⁵³ La première extension du modèle MIRAGE à MIRAGE BioF a été réalisée par une équipe de chercheurs de l'IFPRI et de membres visiteurs comprenant Hugo Valin (usage des sols, mandats d'incorporation des biocarburants, co-produits), Antoine Bouët (représentation énergétique) et David Laborde (commerce et chaîne de valeur).

- Les coproduits issus des activités de pressage et de distillation (meals : tourteaux pour le biodiesel, Dried Distillers Grain for solubles (DDGS) : drèches pour l'éthanol),
- Le secteur des fertilisants,
- Le secteur des carburants pour le transport.

Une deuxième version de MIRAGE-BioF a été conçue en 2011 par l'IFPRI/CEPII (Laborde, 2011) apportant des modifications supplémentaires à la version (2010) décrite ci-dessus. Cette nouvelle version a été utilisée pour l'évaluation de la politique d'aide aux biocarburants de l'Union Européenne (mandat d'incorporation des biocarburants). C'est à partir de cette dernière version que nous détaillons l'ossature interne du modèle (Encart 2). Les équations de MIRAGE-BioF sont réparties en 11 blocs :

- **production**
- **demande finale**
- **marchés des dotations en facteurs**
- marchés des biens
- transport commercial
- revenus et recettes des taxes
- pouvoir de marché (concurrence imparfaite)
- investissement
- prix d'intervention (politiques agricoles)
- capitaux et dynamiques
- émissions de CO₂

Dans la partie suivante, nous détaillons les trois premiers blocs « production, demande et marché dotation en facteurs (en particulier la terre) qui ont principalement été modifiés⁵⁴ par rapport au modèle standard MIRAGE.

Encart 2. Evolutions successives de MIRAGE BioF. ⁵⁵

2001 : Création du modèle en EGC MIRAGE standard au CEPII, Paris.

2007 : Mises à jour de MIRAGE standard sur les aspects agricoles notamment (Decreux & Valin, 2007).

2009 : Première extension de MIRAGE standard à MIRAGE-BioF (Valin et al., 2009).

2010 : Publication d'une étude commanditée par la Commission Européenne visant à analyser l'impact de la politique d'aide aux biocarburants européenne, les possibles modifications dans la politique commerciale des biocarburants de l'UE et l'atteinte des objectifs environnementaux (Laborde et al., 2010).

2011 : Une nouvelle étude a été publiée par l'IFPRI et commanditée par la Commission européenne, utilisant une version de MIRAGE-BioF mise à jour et des choix de scénarios différents de l'étude de 2010 (Laborde, 2011).

2012 : Intégration de l'utilisation de la biomasse ligno-cellulosique pour la production d'énergie (projet en cours, ce mémoire de fin d'étude en constitue une partie).

⁵⁴ Les équations correspondantes aux blocs production et demande sont disponibles en annexe VI.

⁵⁵ Source : Auteur du présent rapport.

III.2. Adaptation aux biocarburants de première génération

La structure de base du modèle MIRAGE-BioF correspond à un équilibre général calculable, dynamique, récursif, comprenant une représentation standard à plusieurs pays et plusieurs secteurs.

1. Production

Chaque pays produit une certaine quantité de marchandises à travers un système de fonctions de production imbriquées **où les inputs intermédiaires et la valeur ajoutée sont combinés à l'aide de la technologie de Leontief pour produire le bien**, chacun d'entre eux étant un **agrégat** d'inputs et de facteurs de production, respectivement. Ici, contrairement à l'approche standard, certains inputs sont directement combinés avec des facteurs de production à l'aide d'une fonction à élasticité de substitution constante (CES) pour les questions de complémentarité ou de substituabilité spécifiques entre inputs et facteurs. Par exemple, le capital et l'énergie sont combinés ensembles aussi bien que les aliments pour animaux et la terre ou encore les fertilisants et la terre (Figure 7).

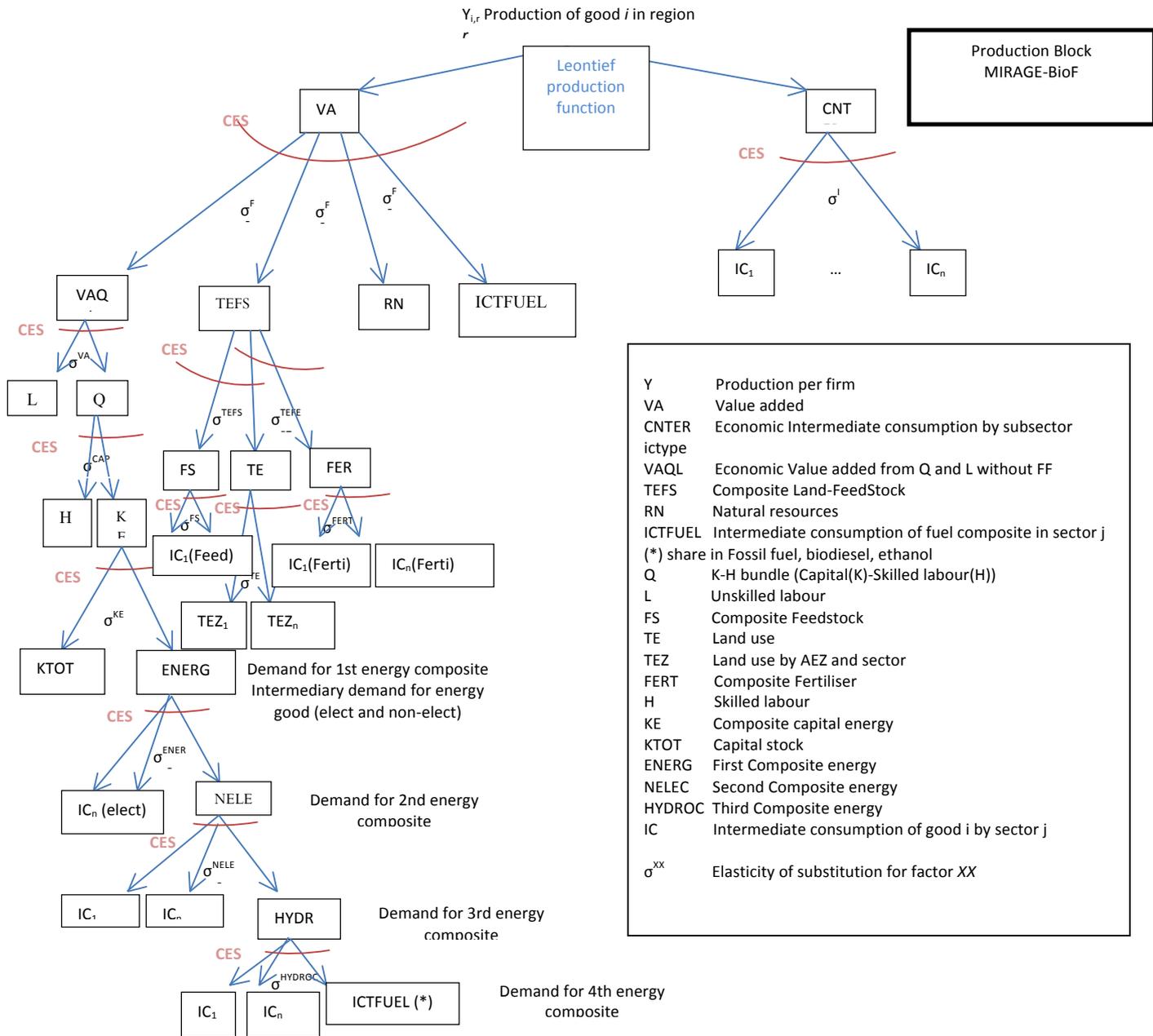


Figure 7. Représentation schématique de la production dans Mirage-BioF

2. Demande

Les biens sont consommés par les consommateurs domestiques finaux (agents publics et privés) ainsi que les firmes, ou bien sont exportés vers les marchés étrangers. Le système de demande de la consommation finale est représenté par une fonction LES-CES (Linear expenditure system- Constant elasticity of substitution) qui est re-calibrée chaque année à

partir d'un scénario de référence (*baseline* en anglais) pour reproduire des élasticités de prix et de revenus cohérentes. La fonction d'utilité LES-CES permet de représenter les préférences pour les différents secteurs tout en tenant en partie compte de l'évolution de la structure de la demande de chaque région avec le niveau de revenu.

Les marchandises importées sont différenciées des marchandises domestiques suivant l'hypothèse d'Armington⁵⁶, laquelle permet de distinguer différents niveaux d'intégration du marché.

La structure de la demande a été conçue pour être adaptée à la consommation d'énergie finale (Figure 8) permettant ainsi de mieux refléter les élasticités prix de la demande d'énergie (car la fonction LES-CES est plus adaptée pour le respect des valeurs des élasticités revenus).

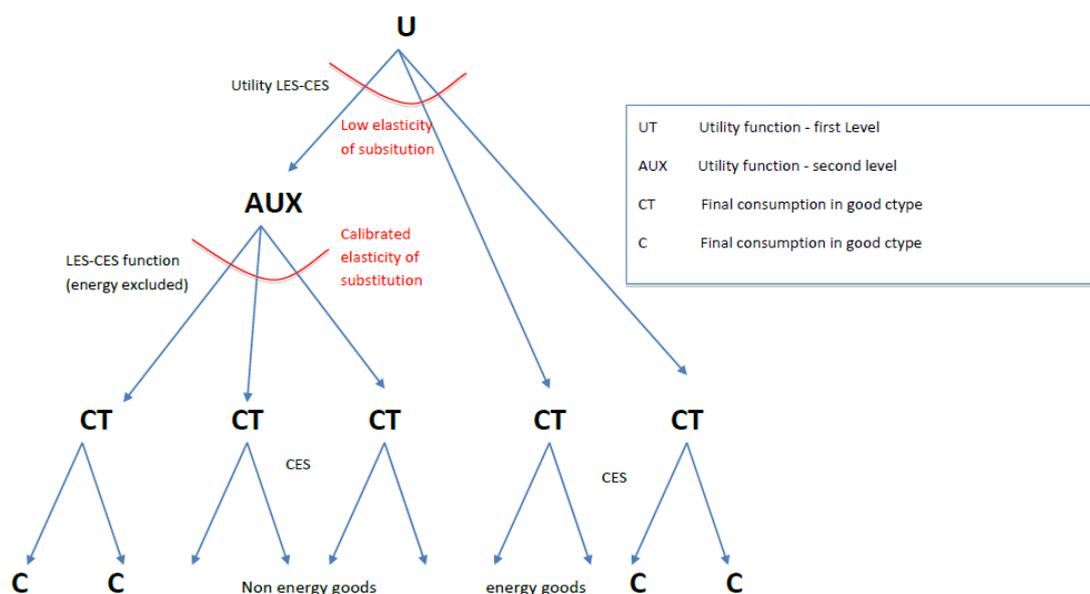


Figure 8. Structure de la demande adaptée à la consommation d'énergie finale.⁵⁷

Les secteurs des biocarburants de 2nde génération sont introduits au niveau de la demande. Les biens énergétiques (*energy goods*, dans l'arbre ci-dessus) comprenaient trois éléments : les carburants fossiles, l'éthanol et le biodiesel. Un nouveau secteur a été ajouté à ces biens : « les biocarburants de seconde génération ». Ce dernier contient deux types de biocarburants « l'éthanol et le diesel seconde génération ».

⁵⁶ L'hypothèse d'Armington (1969) d'imparfaite substituabilité entre deux produits semblables mais d'origines différentes implique que la demande est une fonction CES. Plus spécifiquement dans le modèle, l'hypothèse d'Armington permet de différencier les importations par source (régions exportatrices).

⁵⁷ Source : Valin technical paper (2009) on new MIRAGE-Biofuels development. Dans les équations de MIRAGE-BioF, les fonctions LES-CES sont modélisées aux 1er et 2ème niveaux, néanmoins les fonctions ne sont pas homogènes de degré 1, elles ne peuvent donc pas être imbriquées. De ce fait, les consommations minimales du premier niveau sont fixées à zéro, ce qui revient à avoir une CES au premier niveau (et une LES-CES au deuxième niveau).

III.3. Le marché de la terre et les mécanismes de réallocation

Représentation de l'offre de terre dans MIRAGE-BioF

Le marché de la terre fait l'objet d'une décomposition spécifique. Dans le MIRAGE BioF, une structure 'imbriquée' (*nested*) est utilisée pour répliquer les substitutions entre les céréales et les cultures oléagineuses, par exemple, aussi bien que d'autres utilisations agricoles. Dans cette structure imbriquée, les cultures substituables (céréales, oléagineux) sont donc considérées comme un ensemble séparé des autres catégories de cultures qui sont moins facilement substituables (riz, fruits et légumes par exemple). L'imbrication est représentée en Figure 9. L'allocation de la terre est représentée par une fonction à élasticité de transformation constante. Cette fonction d'offre transforme un unique input (terre agrégée) en plusieurs output (par exemple : terres arables et pâtures). Les cultures considérées avec un degré de substitution important sont le blé, le maïs, le colza, le soja et le tournesol⁵⁸. D'autres cultures sont localisées à un niveau inférieur avec un degré de substitution plus faible. Afin de représenter la pression issue d'usages de la terre autres que les terres dédiées aux cultures, la structure imbriquée intègre en plus les destinées aux pâtures et aux forêts avec des niveaux supplémentaires.

En plus du choix de cette structure imbriquée, deux innovations de substitution caractérisent le modèle MIRAGE-BioF. D'abord, chaque structure imbriquée est indépendante du niveau agro-écologique dans les différentes régions, lequel permet une description plus pertinente des aspects de substitutions entre les cultures qui suivent les conditions agro-climatiques de cultures identiques. Par défaut, une substitution parfaite est supposée à l'intérieur de chaque région pour la localisation de la production dans les zones agro-écologiques.

Par rapport aux autres modèles d'EGC intégrant les secteurs des biocarburants⁵⁹, une seconde innovation présentée dans MIRAGE-BioF pour les CAS est un mécanisme permettant un accroissement des surfaces pour différents usages des sols au niveau de l'AEZ. L'extension est représentée par une fonction d'offre élastique non constante. La valeur de cette élasticité décroît linéairement en fonction de la distance à la limite de la terre cultivable d'après la base de données IIASA GAEZ (l'élasticité est égale à zéro lorsque la surface totale cultivable à l'intérieur de l'AEZ est utilisée). Il est important de reconnaître que de tels paramètres sont très incertains et que les valeurs issues de la littérature varient et ne sont pas disponibles pour de nombreuses régions. La productivité marginale est aussi ajoutée à cette nouvelle terre afin de refléter le fait que l'accroissement des surfaces peut avoir lieu sur des terres de qualités différentes de la terre déjà utilisée.

Rétroactions des forêts gérées et de l'élevage

Bien que de nombreux modèles (FAPRI, AGLINK,...) ne représentent pas les effets rétroactifs, l'effet « pâtures » sur les CAS peut être une grande source d'incertitude. En effet, les demandes dans le secteur de l'élevage et forestiers ont un impact sur les CAS. Il y est supposé que dans certains pays, il y a encore un potentiel pour intensifier la production de cheptel. Ainsi une hausse de la demande n'entraînera pas une hausse proportionnelle de la demande de terre. Ces rétroactions sont prises en compte dans MIRAGE-BioF. Bien que des prairies sont encore disponibles pour l'expansion dans certaines régions telles que l'Afrique

⁵⁸ L'élasticité de substitution pour ces cultures est représentée par la notation CET_1 dans la figure 11. Lorsque l'on s'intéresse à l'élasticité de substitution entre facteurs de production, une élasticité de transformation constante est utilisée : constant elasticity of transformation (CET).

⁵⁹ GTAP, LEI-TAP et EPPA. Une revue de littérature sur les comparaisons des modèles en équilibre partiel et général modélisant les secteurs des biocarburants est disponible en anglais en annexe V.

sub-saharienne ou l'Amérique latine (Bouwman & al., 2005), l'expansion de terres agricoles dans d'autres régions peut entrer en compétition avec la production de bétail et les produits forestiers si les ressources en terres deviennent rares. Ces deux aspects sont modélisés dans MIRAGE-BioF sous la forme de deux options (Laborde, 2011b) :

Option 1 « Pasture and Forest intensification » : l'expansion des terres arables peut avoir lieu sur d'autres types de terres (*forest, arable, pasture* et *unmanaged land*) suivant les observations du passé et si nécessaire, l'intensification est supposée suivre les tendances précédentes afin de libérer la terre disponible requise pour les nouvelles terres arables.

*Option 2 « Pasture and forest competition »*⁶⁰ : dans cette option de modélisation, les pâtures et les forêts sont considérées comme des facteurs directs nécessaires pour la production de bétail et de bois. Ainsi, augmenter cette production ajoute une pression plus élevée sur la terre disponible et peut entrer en compétition avec l'expansion des terres arables pour les cultures alimentaires⁶¹.

Néanmoins, l'utilisation du bois ou des résidus issus des forêts gérées n'est pas encore prise en compte dans le modèle MIRAGE-BioF.

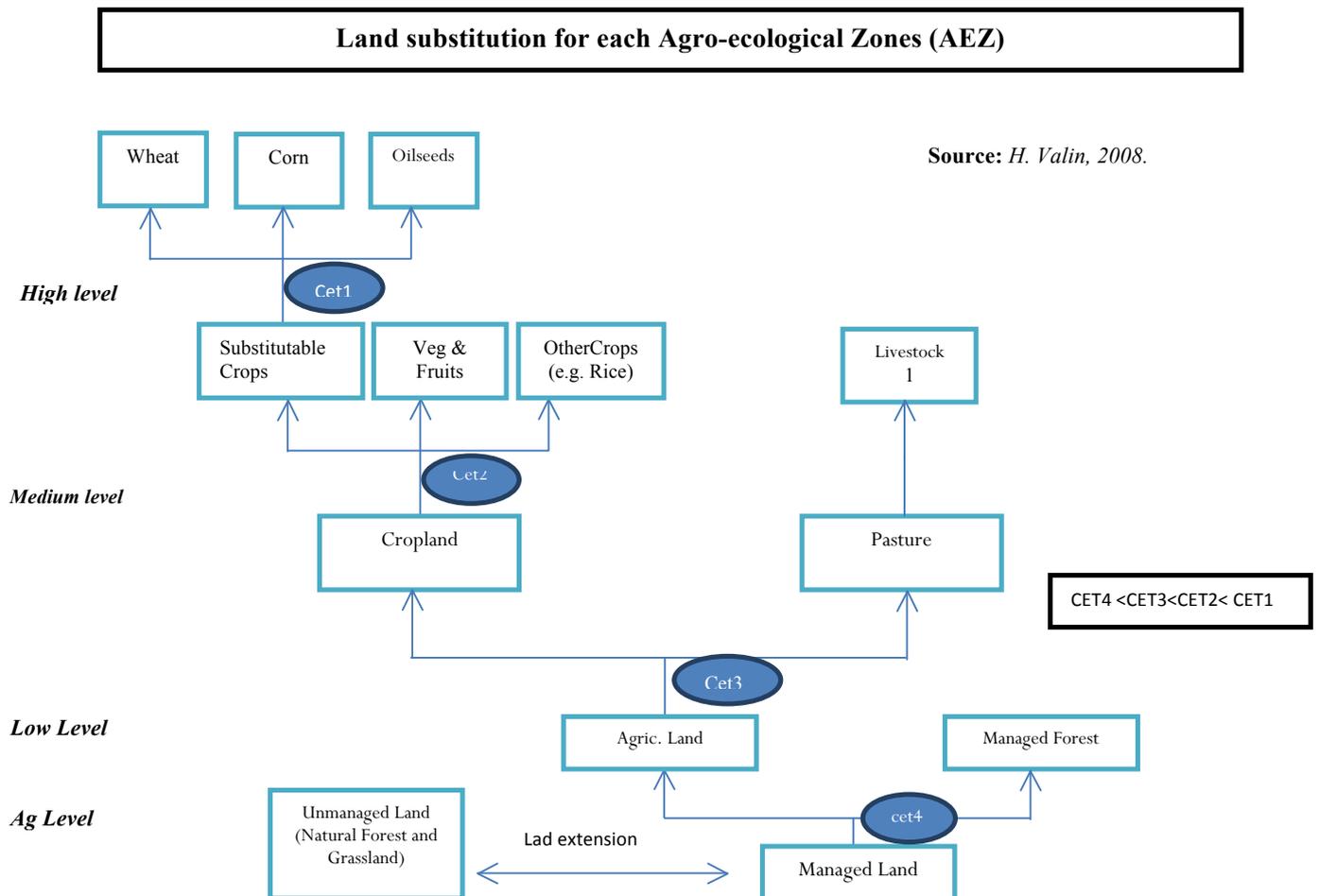


Figure 9. Représentation schématique du marché de la terre dans Mirage-BioF

⁶⁰ Celle de la législation de l'Union européenne.

⁶¹ Les projections sur les terres utilisées pour l'expansion de terres arables peuvent utiliser des observations passées, soit parce que les pâtures et forêts peuvent être moins accessibles si la demande pour leurs produits a augmentée, à cause d'une augmentation des prix de la viande et du bois, soit parce qu'une baisse de la demande associée libérerait plus de terres destinées aux pâtures et aux forêts gérées.

Les équations correspondantes sont disponibles en annexe X.

Le choix de ce modèle pour répondre à la problématique posée est privilégié du fait de sa représentation sophistiquée des substitutions et de déplacements des cultures ayant lieu de manière simultanée (car nous avons un cadre d'analyse en équilibre général). Il convient cependant de garder à l'esprit les inconvénients et avantages des modèles en équilibre général (par rapport aux modèles en équilibre partiel). Une comparaison détaillée des modèles en équilibres partiel et général sur les secteurs des biocarburants et des CAS est disponible en annexe V.

Quelques résultats issus de la littérature

Substitution des usages de la terre

La culture de plantes énergétiques dédiées (contrairement aux résidus agricoles) comporte le risque d'une pression additionnelle sur les terres agricoles et les pâtures. Des modélisations de ces concepts ont récemment été développées en équilibre partiel et en équilibre général dans la littérature existante.

Taheripour, Tyner, & Wang (2011) utilisent un modèle d'équilibre général calculable (GTAP) et modélisent un marché de la terre avec une structure imbriquée à trois niveaux (*Land supply, Cropland, Crop group i*, cf Figure 10). Ils créent alors une substitution plus élevée entre les cultures énergétiques dédiées (*Miscanthus, Switchgrass*) et les pâtures et les usages agricoles (soja, maïs, ...). Cette approche de modélisation crée ainsi une pression additionnelle sur les pâtures, étant un input pour le secteur de l'élevage du bétail. Cette approche est s'appuie sur l'hypothèse *ad hoc* que les « *Dedicated energy crops such as Miscanthus and Switchgrass are much more likely to compete with cropland pasture than they are to compete with much more productive cropland used for corn, soybeans, etc.* » (Taheripour et al., 2011).

Leurs résultats soulignent que les résidus agricoles (en particulier le Corn stover) n'ont pas d'effet significatif sur les CAS. De plus, l'utilisation de cultures énergétiques dédiées, telles que le *Miscanthus* et le *Switchgrass*, induisent des changements d'allocation des sols et des expansions sur des terres naturelles (en particulier les forêts). Ces cultures énergétiques transfèrent une proportion majeure de la production de ces dernières vers les terres allouées aux cultures agricoles (*cropland*) et aux pâtures (*pastureland*). Leurs résultats sont valables sous des hypothèses particulières de rendements des nouvelles cultures dédiées à la production de biocarburants et sous des hypothèses sur leur structure des coûts. L'amplitude de la réallocation de la terre ainsi trouvée, varie selon le type de biocarburant produit et se répartie entre 16% et 35% des surfaces existantes aux EU allouées aux céréales, oléagineux et pâtures avant la production de biocarburants.

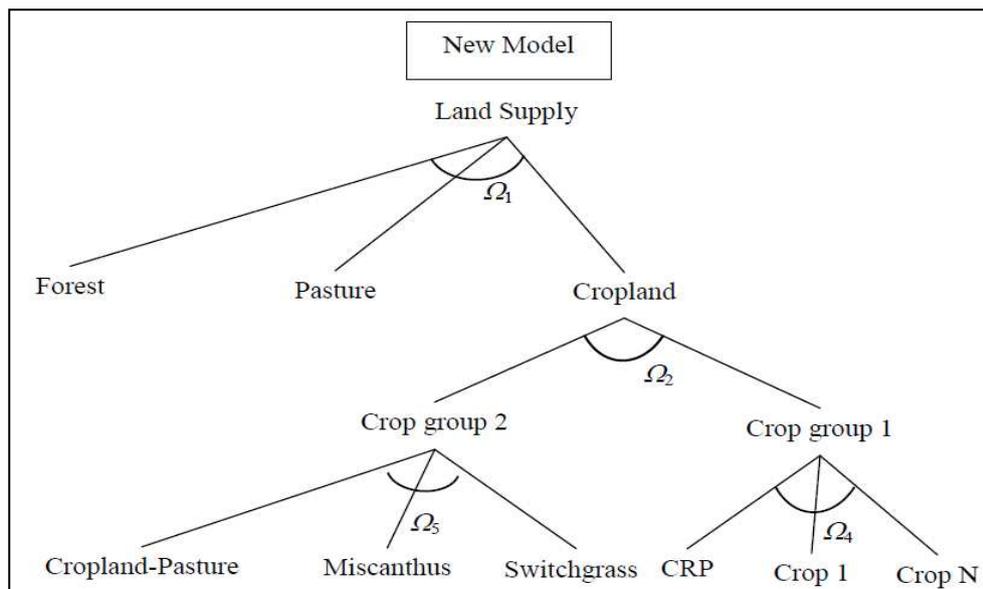


Figure 10. Représentation des substitutions dans les allocations de la terre dans le modèle Gtap-bio-advfuel.⁶²

Havlík et al., (2011) utilisent un modèle en équilibre partiel (EP), GLOBIOM pour évaluer les changements d'affectation des sols directs et indirects pour les deux générations de biocarburants. Ils supposent que les taillis à courte rotation⁶³ peuvent être établis sur des terres marginales, ou entrer en compétition directe avec la production agricole conventionnelle et les autres services. Ils définissent le terme de « terres marginales » dans le sens où « *they are not in the base year attractive for agricultural production and they are not forested* ». Les conclusions de leur étude montrent que biocarburants de seconde génération présentent une meilleure performance que les premières générations en terme de réduction des GES. Les biocarburants de seconde génération, produits à partir de bois provenant de gestion durable de forêts, conduiraient à un facteur CASi négatif (réduction des GES associées aux CAS), alors que les premières générations présentent un facteur CASi positif. Ce résultat est valable à la condition que les biocarburants de seconde génération ne soient pas produits à partir de cultures dédiées à courte rotation en compétition pour les terres agricoles. Sinon, les biocarburants de première génération sont préférables. Lorsque les cultures dédiées sont cultivées sur les terres marginales les émissions associées aux CASi sont les plus élevées de tous les scénarios. Ils expliquent ce résultat par le fait que le modèle choisi 79% des plantations dans « *other natural vegetation* » avec une moyenne de gain net de carbone de 8tCO₂/ha sur 30 ans insuffisante pour compenser la déforestation (alors que s'ils sont plantés sur des terres arables, le gain net de carbone est de 140 tCO₂/ha sur 30 ans). Le bois issu de forêts gérées durablement, résidus ou déchets doivent être mobilisés ou alors les terres marginales et/ou abandonnées doivent être mises en production. Cependant les auteurs soulignent que les matières premières pour les biocarburants de seconde génération sont à choisir avec prudence puisque leur production peut interférer avec d'autres critères de durabilité telle que la conservation de la biodiversité, la protection de l'érosion ou même l'offre de 'bois-combustible' pour les communautés locales.

⁶² Source : Taheripour & Tyner, (2011).

⁶³ Le taillis à courte rotation (TCR) est lié à la fréquence des récoltes, soit tous les 4 à 10 ans. Les taillis à très courte rotation (TTRC) correspondent à une fréquence de récolte tous les 3 ans environ.

Utilisation d'un coût de conversion et non d'une fonction à *constant elasticity of transformation* (CET)

Gurgel et al., (2007) analysent l'impact de l'utilisation de l'éthanol cellulosique sur le long terme à partir du modèle en équilibre général calculable EPPA⁶⁴. Ils n'utilisent pas l'approche de la CET pour la représentation des substitutions dans le marché du facteur terre car cette fonction suppose que l'élasticité reste constante au cours du temps, ce qui rend ces fonctions inopérantes si l'on s'intéresse à un horizon de long terme (impliquant des changements radicaux d'élasticités). Comme alternative à la CET, ils choisissent d'introduire des coûts de conversions qui ont lieu lorsqu'un type de terre est remplacé par un autre. Le modèle n'inclut donc pas de restrictions à la conversion des terres tant que les coûts de conversion sont couverts. De plus, ils évaluent les changements d'allocation des sols lors de la production de biocarburants de seconde génération mais n'évaluent pas les émissions de GES associés aux CAS et ne prennent pas en compte les secteurs de biocarburants de première génération.

Ces coûts de conversion sont aussi utilisés par Havlik & al (2011) dans leur modèle GLOBIOM Ils peuvent être interprétés de la manière suivante : par exemple, les forêts sont uniquement converties en d'autres terres si le bien-être généré dans la nouvelle utilisation est plus grand que le coût de conversion. Ces derniers ont l'inconvénient d'être difficilement mesurables, ils n'existent donc pas d'estimations empiriques de ces coûts. Khanna & al., (2011), dans leur modèle BEPAM en équilibre partiel, contournent ce problème en supposant que les coûts de conversion spécifiques des *Crop Reporting Districts* (CRD)⁶⁵ sont égaux à la rémunération de la terre qui aurait été obtenue en cultivant la culture annuelle la moins profitable dans ce même CRD. Cela suppose que toutes les terres ont des profits non-négatifs pour les productions de cultures annuelles. Lorsque le prix des cultures annuelles augmente, le coût de conversion augmente ; la pente de la courbe d'offre est ainsi plus élevée. Deux types de terres sont considérées dans le modèle BEPAM : les terres agricoles existantes et des terres marginales/pâtures. Leurs hypothèses sur les changements d'usage des terres sont les suivantes : les terres arables peuvent être utilisées pour les cultures alimentaires et pour les cultures énergétiques. Ces mêmes cultures énergétiques peuvent être aussi plantées sur des terres marginales ou des pâtures mais avec un coût de conversion.

Expansion de la terre vers les terres marginales pour les cultures énergétiques dédiées

Dans une étude récente, Swinton, et al. (2011) se posent la question suivante : les Etats-Unis ont-ils suffisamment de terres marginales non destinées aux cultures agricoles pour atteindre les besoins en plantation pour les biocarburants ?

La plupart des études comme celle de Nijssen et al. (2012) abordent le concept des terres marginales à partir de leurs caractéristiques biophysiques. Pour Swinton et al, (2011), cette réponse est insuffisante et l'utilisation de mesures biophysiques peut surestimer l'offre de terres agricoles réellement disponibles pour la production de cultures énergétiques dédiées puisque les propriétaires des terres peuvent avoir d'autres projets. Ils utilisent la mesure économique standard de **la variation de l'élasticité des surfaces mises en culture par rapport à la rémunération espérée de la terre** afin d'apporter une réponse à la question : « dans quelle mesure une augmentation dans le prix de la biomasse va augmenter la surface en terres dédiées aux cultures énergétiques comparées aux autres cultures actuelles comme le

⁶⁴ The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) model. C'est un modèle récursif, dynamique, multi-régions et en équilibre général calculable.

⁶⁵ Leur modèle Biofuel and Environmental Policy Analysis Model (BEPAM) considère les 295 Crop Reporting Districts (CRDs) dans 41 Etats comme des unités de décision spatialement hétérogènes et rapportent à 2030 leur production de cultures simulées et les décisions d'allocation de la terre.

maïs ?». Ils étendent la valeur de cette élasticité obtenue pour les principales cultures (maïs, soja, blé) aux cultures énergétiques dédiées (Switchgrass dans leur article). S'appuyant sur des références issues de la littérature, la cible d'atteindre 57 milliards de litres d'éthanol cellulosique aux U.S. d'ici 2022 fixée par l'*Energy Independence and Security Act of 2007* (EISA) impliquerait la mobilisation d'une surface de terres marginales **de 16 à 21 millions d'hectares**⁶⁶. Sous l'hypothèse qu'une hausse du prix de la biomasse correspond à une augmentation semblable des prix des cultures telles que le maïs, leur élasticité s'élève à 0,032 et signifie qu'une augmentation de la profitabilité de la biomasse induirait une expansion de la terre (non destinées aux cultures alimentaires) de seulement 3 à 4 millions d'hectares soit 1/3 de la surface requise par la cible fixée par l'EISA. **Tenant compte de la réticence⁶⁷ des propriétaires terriens à étendre leur surface en terres aux cultures alimentaires, l'expansion de ces terres⁶⁸ aux cultures énergétiques dédiées serait probablement difficile et coûteuse à atteindre selon ces auteurs.** L'approche de ces auteurs doit être nuancée par la quantification des données considérées. En effet, sont prises en exemple, uniquement deux régions des Etats-Unis. Leurs résultats peuvent pourtant varier selon les contextes régionaux (surfaces initiales en maïs). De plus, une analyse de sensibilité sur les élasticités d'offre de terre par rapport aux prix des cultures pourrait être menée afin de nuancer leurs conclusions.

Les effets de substitutions et d'expansion sont cruciaux dans l'analyse des changements d'allocation des sols lors du développement des biocarburants. Cette revue de la littérature sur les aspects de substitution et d'expansion de la terre devra être prise en compte lors de l'introduction du Miscanthus pour la production de bioénergies dans MIRAGE-BioF. Nous tenterons en effet de répliquer ultérieurement (dans la suite du projet de l'IPFRI) l'étude de Swinton et al (2011) grâce au modèle MIRAGE dédié aux biocarburants.

Introduction du Miscanthus dans l'offre de terre : un exemple de calibrage

Afin d'introduire le Miscanthus dans l'allocation de la terre (Figure 10) du modèle MIRAGE-BioF, une maquette a été construite (sous le logiciel GAMS) pour répliquer l'offre de terre du modèle en EGC de manière simplifiée⁶⁹. Dans cette version, pour des objectifs de simplification, l'offre de terre totale à allouer aux différents usages est considérée comme fixe. Nous obtenons alors un modèle en équilibre partiel.

Avant d'introduire le Miscanthus dans le modèle simplifié, nous ciblons les paramètres clés permettant de comprendre le mécanisme de réallocation des terres lorsque la rémunération de la terre est choquée. Un premier paramètre correspond à la part d'une culture ou d'un autre usage de la terre (pâtures, forêts) dans la culture sous-jacente en terme de surfaces utilisées. Sous GAMS, nous appelons ce paramètre *sharearea*. Par exemple, la part des surfaces allouées au maïs (*corn*) dans la part des surfaces allouées aux cultures substituables (*substituables crops*). Ce partage des surfaces permet de comprendre en partie la réallocation des terres aux différents niveaux de l'arbre (représentés en Figure 10). De plus, l'élasticité de transformation σ est spécifique à chaque AEZ et région ainsi qu'aux différents niveaux de substitution (*high, medium, low, et aggregate*). Ce dernier paramètre, fixé par des valeurs issues de la littérature, va lui aussi affecter l'élasticité prix directe (cf équation ci-dessous).

⁶⁶ Sur la base d'un rendement mature du Switchgrass sur des terres marginales dans les Etats des prairies.

⁶⁷ Cette réticence vient du résultat suivant : bien que les producteurs puissent atteindre un pic de 64% de profits espérés, l'expansion des terres aux cultures alimentaires n'atteint que 2% sur les 3 années suivantes.

⁶⁸ Les auteurs distinguent les non-crop et crop lands. Les non-crops land sont de moins bonne qualité et comprennent les terres à pâtures et les prairies permanentes/temporaires.

⁶⁹ Le fichier GAMS obtenu est disponible en annexe IX. Cette version est en cours d'élaboration. Une version plus approfondie sera présentée lors de la soutenance orale.

$$\varepsilon_{\text{prixdirecte}} = (1 - s)\sigma \text{ où}$$

ε correspond à l'élasticité prix directe

s correspond à la part des surfaces en terre allouées à une culture par rapport à la culture sous-jacente.

σ correspond à l'élasticité de transformation.

Cette formule est issue des fonctions CET qui sont utilisées pour modéliser l'allocation de la terre⁷⁰. Ainsi, lorsque la rémunération de la terre augmente de 1 % au niveau d'une AEZ et d'une culture (maïs par exemple), l'offre de terre allouée aux autres usages va être modifiée. Cette nouvelle allocation va avoir lieu aux différents étages (*high, medium, low, aggregated*) de l'arbre en Figure 10 par un système de répercussion. Ce système de répercussion dépendra non seulement de la part de la terre allouée au maïs dont le prix a été choqué de 1% dans la part de la surface allouée aux cultures du niveau high : « *substituables crops* » mais aussi de l'élasticité de transformation à ce même niveau σ^H .

Dans une étude ultérieure, le Miscanthus va être intégré aux différents niveaux (*niveaux high, medium ou low*) de l'arbre d'allocation des terres. Les mécanismes de substitution et d'expansion seront étudiés au cas par cas afin de cibler quelle insertion aux niveaux *high, medium ou low* a le plus de sens et de cohérence avec la réalité des secteurs agricoles et de l'élevage notamment.

III.4. Méthodologie sur la base de données : Insertion des biocarburants de seconde génération

Afin de représenter la technologie de transformation dans le modèle MIRAGE-BioF. Nous avons dû construire une base de données sur la structure de coût des biocarburants de seconde génération. Dans ce rapport, uniquement deux types de biocarburants sont étudiés « l'éthanol et le diesel cellulose produits à partir de Miscanthus ». Lors d'analyses ultérieures, cette base de données sera étendue à d'autres types de biomasse. De plus, les hypothèses choisies sur les données suivantes sont déterminantes dans la cohérence des résultats.

1. Construction d'une base de données sur la structure de coûts de l'éthanol et du diesel produits à partir de Miscanthus.

Actuellement, les nouvelles industries des biocarburants de seconde génération sont encore à l'étape de démonstration et de recherche et n'opèrent pas dans le monde réel. C'est pourquoi nous avons collecté les données les plus récentes possibles disponibles dans la littérature afin de définir les structures de coûts de ces industries et de leurs technologies de production. La littérature possède une large gamme d'estimations pour les rendements du miscanthus comme nous l'avons souligné dans une précédente partie mais cela est aussi valable pour les coûts de production. Les valeurs sont choisies sur une même hypothèse de cycle de vie du Miscanthus : 10 ans.

Nous présentons la structure de coût du Miscanthus pour deux technologies de production : la voie biochimique et la voie thermochimique via le processus de conversion « Fischer-Tropsch Diesel ». Ces données serviront à la reconstruction ascendante (*bottom-up*) des coûts de production des secteurs des biocarburants « avancés » dans MIRAGE-BioF. Ces choix technologiques ont été opérés selon les disponibilités des valeurs collectées dans la littérature existante.

⁷⁰ Les équations de notre modèle simplifié sont décrites en annexe X.

Les items des coûts de production sont organisés comme requis dans les modèles d'EGC. Les structures de coûts des modèles en équilibre général se distinguent en deux parties : la valeur ajoutée (coût du travail et du capital) et les facteurs intermédiaires. Dans la structure de coût établie pour le Miscanthus, les facteurs intermédiaires correspondent au coût de la matière première (biomasse), de l'énergie fossile utilisée, les coûts opérationnels, le coût des intrants chimiques tels que les enzymes et le coût de transport entre l'exploitation agricole et la bioraffinerie.

La Figure 11 présente la structure des coûts pour les biocarburants produits à partir de Miscanthus. Les hypothèses et les sources que nous avons utilisées pour la collecte de ces données sont détaillées dans le Tableau 7⁷¹.

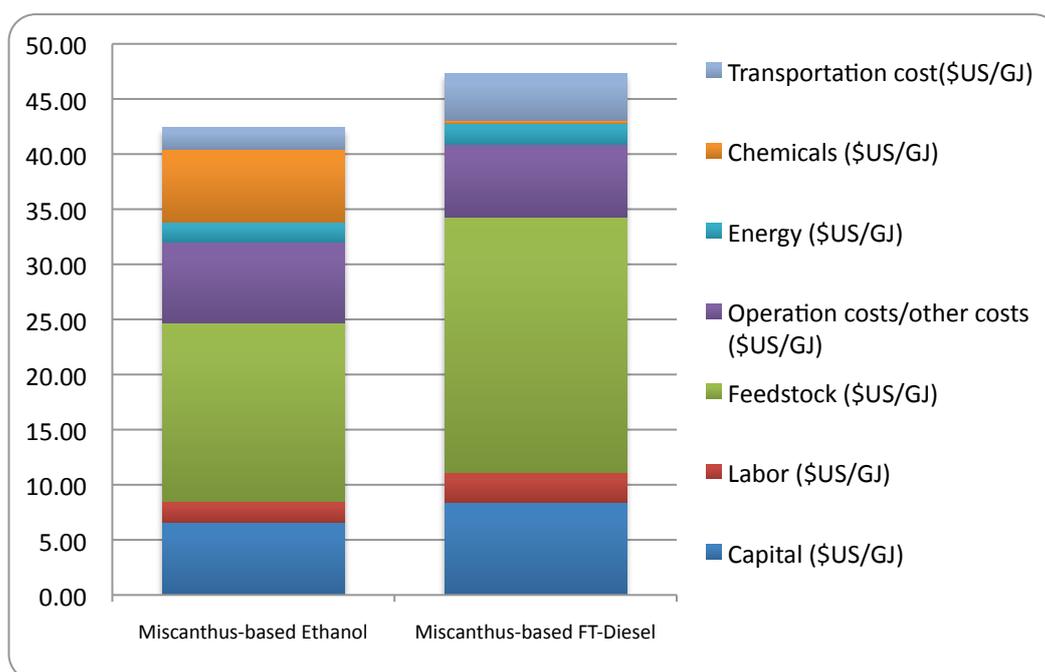


Figure 11. Structure de coût de deux types de biocarburants (éthanol cellulosique et FT-Diesel) produits à partir de Miscanthus.

La Figure 11 indique que le coût du **capital, de la biomasse et les coûts opérationnels** sont les coûts principaux pour les producteurs de biocarburants.

Tableau 7. Description des items de coûts des deux types de biocarburants (éthanol cellulosique et FT-Diesel) produits à partir de Miscanthus⁷²

	Unités	Description
Unit costs	\$US/GJ	Values for ethanol are from Taheripour et al. (2011); from Wright and Brown (2007) for FT Diesel, who take as reference a plant with a production capacity of 150 million of gge ⁷³ .
Capital costs	\$US/GJ	There are calculated under different scaling exponents. For ethanol, a value of 0.63 is used and 0.7 for the thermochemical process. These

⁷¹ Les données sont disponibles en annexe VII.

⁷² Source : compilation des données par l'auteur (cf. Annexes VII).

⁷³ Gallon gasoline équivalent (gge).

		values respect the scale behavior of technology, respectively. It includes profits, interests and capital depreciation.
Labor costs	\$US/GJ	For thermochemical conversion, the labor costs are estimated from biochemical process (Taheripour et al., 2011) taking into account energy content of biofuel (GJ/dry ton).
Co-products credits	\$US/GJ	Electricity and heat co-produced for both conversion routes are neglected (Taheripour et al., 2011; Wright and Brown, 2007). However, it should be noteworthy that other studies consider co-produced electricity and heat (Tarka, 2009).
Feedstocks costs	\$US/GJ	Taheripour et al. (2011) assume a feedstock price at 109\$US/dry ton. We use this amount to get feedstock cost by using the energy conversion for each pathway (in dry ton/GJ).
Transport costs	\$US/GJ	0.27US\$ per ton per mile (biochemical process) and 0.40US\$ per ton per mile (thermochemical process). Additionally, like Taheripour et al. (2011), we assume 50 miles between the farm gate suppliers and bio-refineries. The transportation costs are obtained by using the energy content of each type of cellulosic biofuels.
Operation costs	\$US/GJ	Include variable and fixed operation and management (O&M) costs.
Energy costs	\$US/GJ	Energy refers to fossil energy inputs into the plant that appears as chemical energy of the product fuel. For FTD biofuel, energy costs are estimated on the fuel efficiency difference between biochemical and FT process, which is 11%. We checked the data consistency by comparing them with quantity of fossil energy required in each pathway (GJfossil energy/GJbiofuel) and the actual price of fossil energy (crude oil, natural gas, electricity)
Chemicals costs	\$US/GJ	Include enzymes costs for biochemical conversion process and the type of catalyst (here 'Zinc catalyst) for the thermochemical conversion process (via gasification).

La qualité des données est essentielle pour mener une bonne analyse économique même si cette partie de collecte et d'harmonisation des informations est un long travail et rebute nombre d'économistes. La construction de cette structure de coût a été effectivement longue du fait de l'harmonisation des données issues de la littérature (sélection des données selon un choix d'hypothèses identiques par exemple) et du fait de la vérification d'une cohérence entre les données physiques et économiques (par exemple, le coût de l'énergie requise lors du processus de transformation de la biomasse en biocarburants en \$/GJ (valeur économique) et la quantité d'énergie fossile en GJ requise pour produire une unité de biocarburants en GJ (valeur physique) se doivent d'être cohérents avec le prix de l'énergie fossile, gaz naturel, pétrole et électricité). Ces données sont intrinsèquement accompagnées d'une incertitude élevée puisque les biocarburants de 2^{nde} génération ne sont pas commercialisés. Les données, non disponibles dans la littérature, ont été approchées en posant des hypothèses. Par exemple, le coût du travail dans la voie de conversion thermochimique n'était pas disponible, nous

avons calculé la moyenne du coût du travail pour la voie de conversion biochimique de plusieurs types de biomasse. Cette moyenne a été pondérée par les coefficients d'efficacité énergétique (GJ de biocarburant par tonne de matière sèche de biomasse convertie). La valeur ainsi obtenue nous a permis d'obtenir la valeur du coût du travail pour la voie thermochimique après ajustement à son coefficient d'efficacité énergétique.

Une fois notre base de données obtenue sur la structure des coûts nous pouvons l'intégrer dans la matrice de données du modèle en équilibre général MIRAGE-BioF.

2. Intégration des structures de coûts dans MIRAGE-BioF

a. Qu'est-ce qu'une matrice de comptabilité sociale ?

L'utilisation d'un modèle en équilibre général calculable dans un objectif de simulation d'une politique publique requiert une matrice de comptabilité sociale (MCS) pour le calibrage du modèle à l'économie considérée. La MCS est un tableau à double entrée qui présente les comptes d'un pays, d'une région ou d'un ensemble de pays ou régions, dans une économie déterminée. Elle donne une image des relations intersectorielles de l'économie d'un pays à un temps t et se présente sous une forme matricielle qui développe les interrelations entre le tableau des ressources et des emplois. La MCS constitue une généralisation du tableau "entrée-sortie" de Leontief (Leontief, 1986).

b. Exemple illustré

Tableau 8. Exemple simplifié de désagrégation d'une MCS ciblant le secteur des biocarburants.⁷⁴

		Activités			Biens			Facteurs	Institutions		Capital	Reste du monde	
		agricultu re	BR	reste	agricultu re	BR	reste		ménages	gvt			
Activités	agriculture				ventes totales					subventi ons			TOTAL recettes
	Bioraffineries (BR)												
	reste												
Biens	agriculture	conso. intermédiaires							conso. finale	conso. gvt	Capital fixe et variation de stocks	exportations	TOTAL utilisation de biens
	BR												
	reste												
Facteurs (travail, Capital)		valeur ajoutée									rémun. Fact. RdM	TOTAL rémun. Facteurs	
Institutions		taxes			TVA et droits de douanes			revenus factoriels				transfert RdM vers instit.	TOTAL ressources ménages et gvt
Capital									épargne			capacité de financement	épargne totale
Reste du monde (RdM)					importations			revenus factoriels RdM	transferts RdM	vers	Capital fixe RdM		recettes RdM
		TOTAL dépenses			TOTAL offre de biens			TOTAL revenu facteurs	TOTAL dépenses ménages et gvt		TOTAL formation brute de capital fixe	dépenses de RdM	

⁷⁴ <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC53558.pdf>, consulté le 11 Juin 2012.

La MCS offre un cadre qui peut être adapté lors d'un travail de collecte des données. **Dans la limite de leurs structures (tables ressources - dépenses), la MCS permet d'avoir une certaine souplesse dans la désagrégation des activités, des unités institutionnelles et des facteurs productifs.** Nous présentons, dans le Tableau 8, un exemple de désagrégation de la MCS pour le secteur des biocarburants. A chaque ressource (en ligne) correspond une dépense (en colonne). Par exemple, le produit des ventes d'une activité (bioraffinerie) est réparti en dépenses de valeur ajoutée (dépenses de fonctionnement : salaires et capital : dépréciation du capital, profits) et en dépenses de consommation intermédiaires (opérationnelles, énergies fossiles, composants chimiques (enzymes par exemple), etc.

Sur la base de cette MCS désagrégée pour le secteur des biocarburants, les paramètres du modèle en EGC MIRAGE-BioF seront calibrés. Une situation de référence sera alors définie pour servir de point de départ à la simulation de différents scénarios (cf. dernière section partie III). Afin d'apprécier l'objectif d'incorporation européen des biocarburants dans les transports d'ici 2020 et plus particulièrement les biocarburants de seconde génération, il faut d'abord projeter tous les secteurs européens (représentés dans le modèle (cf. annexes VIII)) à l'horizon 2020 sans le développement des biocarburants de seconde génération puis en les introduisant afin d'évaluer leur impact.

Pour ces raisons, la situation de référence obtenue à partir du modèle MIRAGE-BioF et utilisée dans Laborde, Al-riffai, & Dimaranan, (2010)⁷⁵. En pratique, cette situation de référence est obtenue en laissant le modèle évoluer librement sous certaines hypothèses tendancielle (évolution du progrès technique, évolution des habitudes alimentaires ou encore des tendances macro-économiques).

III.5. Scénarios envisagés

Une fois la situation de référence construite, il s'agira de simuler différents scénarios pour évaluer l'impact du développement des biocarburants de seconde génération en Union européenne⁷⁶. Dans cette partie, nous développons les scénarios envisagés correspondants à une augmentation de la demande des biocarburants (les deux générations séparément puis combinées). Les NREAPs permettent de prédire que les biocarburants "avancés" contribueront à **2,7 million tons of oil equivalent (Mtoe) dans les transports d'ici 2020 dans l'Union Européenne soit approximativement 11% de la consommation totale de biocarburants** (Vierhout, 2011).

1. Estimations issues des plans d'actions (NREAPs) pour les biocarburants de seconde génération

Les objectifs de production d'énergies renouvelables à l'horizon 2020 ont été définis au niveau national pour chaque Etat membre de l'Union Européenne dans des plans d'actions, appelés aussi NREAPs. Les efforts en matière de biocarburants de première et deuxième générations pour atteindre la cible des 10% d'énergie renouvelable dans les transports routiers d'ici 2020 sont chiffrés dans ces plans d'actions. Les graphiques ci-dessous ont été élaborés à partir d'une compilation des données des 27 plans d'actions⁷⁷.

⁷⁵ La réforme de la Politique Agricole Commune (Post 2013) n'est à ce stade pas prise en compte dans la situation de référence.

⁷⁶ Les niveaux de désagrégation géographiques et sectoriels, utilisé pour MIRAGE-BioF, sont détaillés en annexe VIII.

⁷⁷ Source : NREAPs, utilisation de la base de données mise à jour en 2011 par la Commission européenne.

a. Partage sources d'énergies renouvelables dans le transport : biocarburants 1^{er} et 2nd générations en 2020 (calculés sur la base du niveau estimé dans les NREAPs en énergie Ktoe)

total 1 st génération	8,6%
total 2 nd génération	0,9%

Les biocarburants de première génération représenteront en 2020, 8,6% du total des sources d'énergies renouvelables dans les transports en ktoe en 2020. Les biocarburants de seconde génération auront une part de 0,9%.

b. Niveau de biocarburants de seconde génération en 2020 (en Ktoe)

Bioethanol 2 nd Gen (Ktoe)	555
Diesel 2 nd Gen (Ktoe)	1755
Autres biocarburants 2 nd Gen (Ktoe)	356
Total	2667 ktoe

La quantité d'énergie des biocarburants de seconde génération produite en UE par les 27 Etats membres atteindrait 2,7 Mtoe selon les estimations issues des Plans d'actions.

c. Partage selon les types de biocarburants de seconde génération en 2020

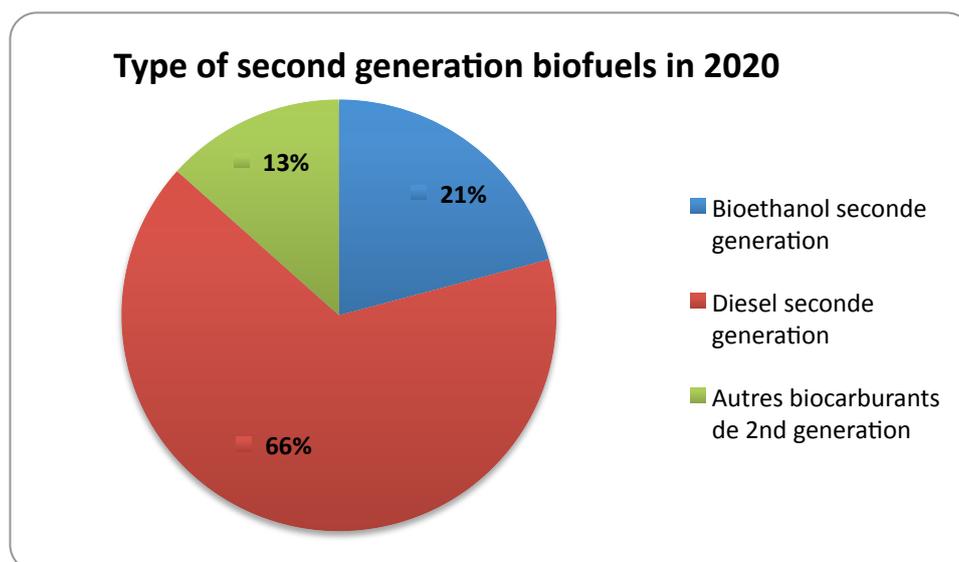


Figure 12. Type de biocarburants de seconde génération en 2020, estimations issues des NREAPs, 2011.

Le parc automobile de l'Union Européenne étant à majorité orienté « diesel » (la consommation en 2011 de diesel en Europe était de 72% des carburants consommés dans les transports routiers contre 28% pour l'essence (actu-environnement, 2012). Nous pouvons alors nous attendre à un fort pourcentage de production de diesel de seconde génération en 2020. Selon les plans d'actions, les biocarburants de seconde génération en UE seront majoritairement du diesel de seconde génération (66%), en deuxième position l'éthanol cellulosique (21%) et enfin les autres biocarburants de seconde génération (13%) (Figure 12).

d. Partage des biocarburants de seconde génération par pays en 2020

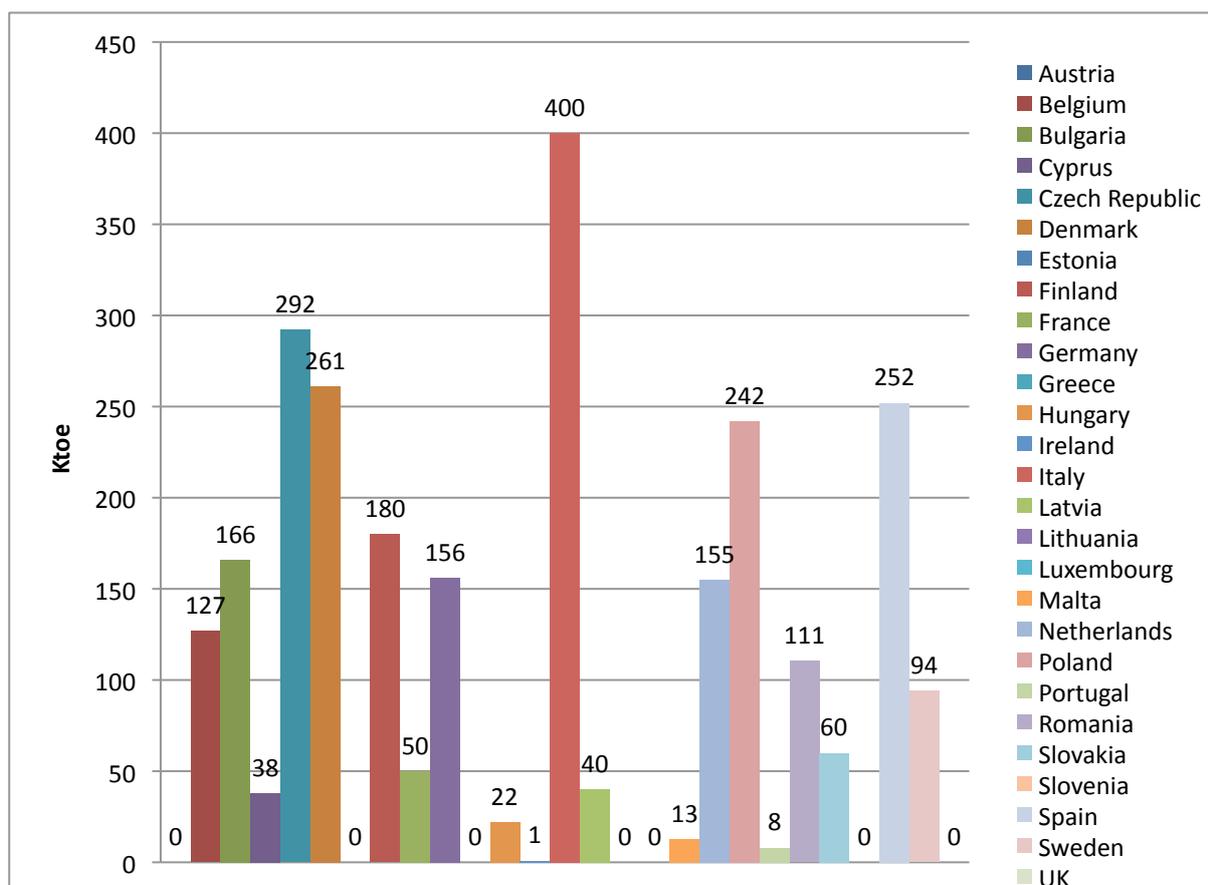


Figure 13. Part des biocarburants de seconde génération (en énergie Ktoe) par pays utilisée dans les transports en 2020⁷⁸.

La Figure 13 représente les niveaux énergétiques de biocarburants de seconde génération (en kToe) pour les 27 Etats membres de l'UE. Il peut paraître incohérent que la prévision de production de biocarburants de 2nde génération du Royaume Uni (RU) soit à zéro alors que la production de Miscanthus s'y développe rapidement. A ce jour, le RU consacre le Miscanthus produit à la production de bioélectricité uniquement et ne prévoit pour l'instant pas de l'utiliser pour produire des biocarburants de seconde génération.

2. Scénarios envisagés

Trois scénarios pourront être simulés afin de comparer les effets du développement des biocarburants de seconde génération sur les CAS et les émissions de GES qui leur sont associées:

- 1- demande additionnelle de biocarburants de première génération uniquement
- 2- demande additionnelle de biocarburants de seconde génération uniquement
- 3- demande additionnelle de biocarburants de 1^{ère} et 2^{ème} dans les proportions estimées dans les NREAPs. L'impact du taux d'incorporation obligatoire de l'UE en accord avec les scénarios d'implémentation dans les NREAPs des 27 pays membres pourra alors être évalué. Pour cela, un choc sur la demande de biocarburants sera introduit correspondant à l'hypothèse que l'UE consommera 2,7 Mtoe de

⁷⁸ estimations issues des NREAPs, 2011.

biocarburants de seconde génération (basé sur le Miscanthus) d'ici 2020.

Les résultats issus des scénarios seront interprétés à la lumière des interrogations suivantes :

Dans une analyse ultérieure nous distinguerons les résultats obtenus pour le facteur CAS⁷⁹ selon,

- 1- le type de biocarburants seconde génération : Le facteur CAS est-il plus élevé pour l'éthanol cellulosique ou le FT-Diesel ? Quel est l'écart du facteur CAS entre ces deux filières.
- 2- la région d'offre : le résultat dépend de la région où il est possible de cultiver le Miscanthus destiné à la production des biocarburants. Le facteur CAS est-il plus élevé selon qu'on produit du miscanthus en région 1 ou en région 2 (déforestation ou non, caractéristiques différentes des sols, par exemple) ? Comment l'UE sera affectée en comparaison des autres régions géographiques ?

De plus, il conviendra de répondre aux questions suivantes :

- 3- Quelle quantité de terre (par région modélisée) sera requise sous ce mandat additionnel de biocarburants de seconde génération d'ici 2020 ?
- 4- Quel(s) type(s) de terre sera affecté(s) par cette extension : terres agricoles (cropland), forêts (unmanaged forest), pâtures (pasture land) ?
- 5- Les émissions reliées aux CAS diminuent-elles lorsque le secteur des biocarburants de seconde génération est introduit dans le modèle ?
- 6- Quelle est la part des changements d'allocation des sols associés aux biocarburants de seconde génération ? relativement aux biocarburants de première génération ? la différence est-elle élevée ?

Les résultats issus des simulations d'un modèle ne sont que l'expression quantifiée d'un certain nombre de mécanismes bien identifiés. Notre objectif ne sera pas de donner une réponse à la question de l'impact de telle ou telle politique publique mais plutôt d'offrir un point de départ permettant le chiffrage synthétique d'un mécanisme de base, ici les changements d'allocation des sols dus à la production et à la consommation de biocarburants de seconde génération. Il est donc nécessaire d'élaborer une analyse adaptée à l'interprétation des résultats tenant compte de la problématique considérée, des hypothèses et des mécanismes non inclus dans le modèle.

La technique de validation des résultats obtenus est l'analyse de sensibilité qui devra être menée sur les paramètres les plus incertains de la même façon que cette évaluation a été effectuée dans les rapports précédents de l'IFPRI évaluant les incertitudes reliées aux paramètres du côté de l'offre du modèle. Ces analyses de sensibilités seront menées grâce à des simulations de Monte-Carlo (1000 occurrences de simulation de Monte Carlo sur chaque paramètre testé⁸⁰) afin d'évaluer les marges d'incertitudes des résultats du modèle. Les paramètres considérés pour l'analyse de sensibilité lors de l'évaluation des effets des biocarburants de 1^{ère} génération dans MIRAGE-BioF peuvent l'être pour les biocarburants de seconde génération.

⁷⁹ Pour une explication de l'indice de mesure des émissions associées aux CAS « facteur CAS » voir partie I contexte.

⁸⁰ Ce nombre d'occurrences correspond à un choix arbitraire en raison de la contrainte de temps.

Il s'agit :

- 1\ des rendements initiaux du Miscanthus,
- 2\ de l'élasticité de la réponse endogène des rendements,
- 3\ de l'élasticité de la substitution de la terre entre le Miscanthus et les autres cultures,
- 4\ de l'élasticité de l'expansion de la terre sur les autres couvertures des sols,
- 5\ de l'élasticité d'Armington (entre la production domestique et les importations, e.g.),
- 6\ de la rémunération des rendements marginaux sur les terres cultivées.

Encart 3. Choix des tests de Monte Carlo pour les analyses de sensibilité du modèle d'EGC.

Pagan et Shannon (1985) et Harrison et Vinod (1992) développent différentes méthodes pour effectuer des tests de sensibilités. Abdelkhalek (1999) développe également des méthodes pour la construction de régions de confiance pour les variables endogènes en exploitant l'information donnée par le degré d'incertitude qui entoure les valeurs numériques attribuées aux paramètres des modèles d'EGC. Le choix des simulations de Monte-Carlo et la notion de tests randomisés permet de mieux approcher la non-linéarité du modèle MIRAGE-BioF.

Conclusion et discussion

Au cours de l'année 2012, la Commission européenne devrait communiquer son projet législatif concernant la question des changements d'allocation des sols indirects. L'impact des biocarburants de 1^{ère} génération sur les CAS remet en cause l'objectif environnemental de réduction des GES, objectif qui sous-tend la politique publique de soutien aux biocarburants de l'UE. Dans ce contexte et à l'heure où les investissements dans le secteur des biocarburants de 2^{nde} génération sont florissants en UE et aux EU, la question de l'impact de l'utilisation de biomasse ligno-cellulosique pour la production d'énergie sur les CAS est légitime. La réponse à cette question peut remettre en cause l'efficacité environnementale de cette nouvelle génération et de ce fait les investissements réalisés à ce jour.

C'est dans ce contexte que l'IFPRI souhaite intégrer les biocarburants de 2^{nde} génération et les bioénergies issues de la biomasse ligno-cellulosique dans un cadre d'analyse en EGC afin de pouvoir à l'avenir analyser les impacts de l'utilisation de biomasse ligno-cellulosique pour la production d'énergies sur les CAS. Les biocarburants de 2^{nde} génération sont encore au stade de « démonstration » et ne sont pas encore commercialisés en 2012. Cette caractéristique impose la mise en œuvre d'une méthodologie particulière dans notre analyse. Pour ce faire, ce mémoire s'intéresse aux structures de coûts de ces nouveaux secteurs et aux rendements de la biomasse ligno-cellulosique considérée : le Miscanthus. Le choix de cette biomasse, pour une étude à l'échelle de l'Union européenne, est justifié par le fait que le Miscanthus est de plus en plus étudié en Europe pour son potentiel de production de bioénergies.

Si les caractéristiques agronomiques et énergétiques du Miscanthus en font une biomasse idéale pour la production d'énergie en Europe, cela doit être nuancé par sa viabilité économique. D'une part, cette viabilité économique dépend du coût de transport et de stockage du Miscanthus ainsi que de son coût de conversion en biocarburants. D'autre part, la mise en culture du Miscanthus dépendra de son coût de production relativement au coût de production de blé ou d'autres céréales, par exemple. Les bonnes spécificités biophysiques du Miscanthus doivent être nuancées par l'hypothèse peu claire que cette biomasse -destinée à la production de biocarburants- peut être cultivée sur des terres marginales. Si ce concept de terre marginale est retenu dans certaines législations (Chine, notamment), il reste à le définir statistiquement. La demande de terre pour les cultures énergétiques dédiées (Miscanthus, Switchgrass,..) pose non seulement la question de substitution avec d'autres usages des terres agricoles ou avec des pâtures mais aussi la question d'expansion sur ces dernières ou sur des terres marginales. Outre la substitution et l'expansion, le développement des biocarburants de seconde génération peut être aussi obtenu par une intensification des rendements du Miscanthus. Cela pose la question de l'ajustement des rendements du Miscanthus sur différents types de terre pour de meilleures projections. De plus, il ne faut pas sous estimer les hypothèses sur le rendement de conversion de cette biomasse en biocarburants dans l'analyse. Afin de tenir compte des éléments précédents nous partons du modèle en équilibre général MIRAGE-BioF. Nous avons alors construit une base de données sur la structure de coût de deux biocarburants : l'éthanol cellulosique et le FT Diesel renouvelable produits à partir d'une seule biomasse –le Miscanthus- et à partir de deux technologies de conversion (biochimique et thermochimique/gazéification). A la suite de ce mémoire, ce jeu de données sera intégré dans la matrice de comptabilité sociale du modèle MIRAGE-BioF et permettra d'inclure le secteur « virtuel » (car non commercialisé) des biocarburants de 2^{nde} génération dans le modèle⁸¹. Des simulations seront ensuite conduites selon trois scénarios, à partir des NREAPs des 27 Etats membres, afin d'évaluer l'impact de l'utilisation du Miscanthus pour la

⁸¹ Une production initiale de Miscanthus par région par AEZ devra être fixée.

production de biocarburants sur les CAS.

Les limites, les manques et les perspectives

Etant donné que cette nouvelle génération de biocarburants n'est pas encore commercialisée, nous avons dû nous appuyer sur les données issues de la littérature plus ou moins récentes pour construire la structure de coût des « nouveaux » secteurs. Selon les données choisies, les résultats finaux peuvent fortement différer. C'est pourquoi dans la suite du projet des analyses de sensibilité seront réalisées sur les paramètres du modèle les plus incertains.

Dans ce rapport nous n'avons représenté qu'un seul input ligno-cellulosique « le Miscanthus ». C'est une hypothèse restrictive car il existe une multitude de matières premières pour les biocarburants de la nouvelle génération (cf. Annexe I). Le type de matière première compte dans l'évaluation du facteur CAS (Cara et al., 2012). De plus, contrairement aux biocarburants de première génération où le biodiesel et l'éthanol sont produits à partir de matières premières différentes, l'éthanol et le diesel cellulosique peuvent utiliser la même biomasse, créant ainsi une compétition supplémentaire sur le type de biomasse ligno-cellulosique choisie. A la suite de ce mémoire de fin d'étude, cette analyse sera élargie dans le cadre des travaux de l'IFPRI à d'autres types de biomasse ligno-cellulosique : Switchgrass ; résidus agricoles issus de la culture de maïs, blé par exemple; résidus de canne à sucre (feuilles, bagasse) et résidus forestiers. Les résidus agricoles devront être abordés d'une manière spécifique dans la modélisation. Bien souvent présentés comme une solution au problème des CAS, il ne faut pas oublier que ces résidus sont une source nutritive nécessaire en oligo-éléments lorsqu'ils sont laissés au sol. Le retrait d'une quantité non négligeable de résidus agricoles du champ destiné la production de biocarburants pourrait alors induire une baisse des rendements agricoles.

De plus, les coproduits de la production de biocarburants de seconde génération sont principalement la bioélectricité et la chaleur. Ils peuvent être utilisés lors de la transformation des biocarburants en bioraffineries ou être vendus. Ces produits, également issus de la biomasse ligno-cellulosique, devront être intégrés dans le modèle pour une meilleure représentation sectorielle et une meilleure évaluation *in fine* du facteur de changement d'allocation des sols.

Références

- Bauen, a W., Dunnett, a J., Richter, G. M., Dailey, a G., Aylott, M., Casella, E., & Taylor, G. (2010). Modelling supply and demand of bioenergy from short rotation coppice and Miscanthus in the UK. *Bioresource technology*, *101*(21), 8132–43. doi:10.1016/j.biortech.2010.05.002
- Bouwman, a. F., Van der Hoek, K. W., Eickhout, B., & Soenario, I. (2005). Exploring changes in world ruminant production systems. *Agricultural Systems*, *84*(2), 121–153. doi:10.1016/j.agsy.2004.05.006
- Bracmort, K., Schnepf, R., Stubbs, M., & Yacobucci, B. D. (2011). Cellulosic Biofuels : Analysis of Policy Issues for Congress.
- Bureau, J.-C., & Gohin, A. (2005). Les modèles d'analyse économique et leur utilisation pour les négociations commerciales sur l'agriculture.
- CE DIRECTIVE/2009/28. Relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. , Journal officiel de l'Union Européenne 16–62 (2009).
- Campbell, J. E. (2009). Greater transportation Energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol, 324(1055). doi:10.1126/science.1168885
- Cara, S. D., Goussebaile, A., Gâteau, R., Levert, F., Quemener, J., Bruno, V., Bureau, J.-C., et al. (2012). Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants. *Rapport final ADEME réalisé par l'INRA Contrat 10-60-C0039*, 1–96.
- Carroll, A., & Somerville, C. (2009). Cellulosic biofuels. *Annual review of plant biology*, *60*, 165–82. Retrieved from <http://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.arplant.043008.092125>
- Chen, X., Khanna, M., & Huang, H. (2012). Land Use and GreenHouse Gas Implications of Biofuels: Role of Technology and Policy.
- Decreux, Y., & Valin, H. (2007). MIRAGE , Updated Version of the Model for Trade Policy Analysis Focus on Agriculture and Dynamics. *CEPII*.
- EPA. (2010). Renewable Fuel Standard Program (RFS2) Regulatory Impact Analysis.
- Eggert, H., Greaker, M., & Potter, E. (2011). *Policies for second generation biofuels Current status and future challenges*.
- European Commission. (2011). report on the operation of the mass balance verification method for the biofuels and bioliquids sustainability scheme in accordance 18(2) of Directive 2009/28/EC.
- European Environment Agency. (2007). *Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture*.
- Fischer, G., Hizsnyik, E., Prieler, S., & van Velthuisen, H. (2007). Assessment of biomass potentials for biofuel feedstock production in Europe: Methodology and results.
- GAMS. (2012). GAMS Software 23.9. Retrieved August 2, 2012, from <http://www.gams.com/download/>
- Gall, C. L., Pairault, O., & Lemaire, Y. (2008). Elaboration d'un référentiel méthodologique pour la réalisation d'Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération en France Synthèse.
- Grignon, P., & Positive, E. (2008). *Rapport intermédiaire : intérêt et potentialités de la production de Miscanthus*. Thirverval Paris-Grignon.
- Gurgel, A., Reilly, J. M., & Paltsev, S. (2007). Potential Land Use Implications of a Global Biofuels Industry. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, *5*(2), 1–34. doi:10.2202/1542-0485.1202
- Haberl, H., Sprinz, D., Bonazountas, M., Cocco, P., Desaubies, Y., Henze, M., Hertel, O., Johnson, R. K., Kastrup, U., Laconte, P., Lange, E., Novak, P., Paavola, J., Reenberg, A.,

- Hove, S. V. D., et al. (2012). Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy*, 45, 18–23. doi:10.1016/j.enpol.2012.02.051
- Haberl, H., Sprinz, D., Bonazountas, M., Cocco, P., Desaubies, Y., Henze, M., Hertel, O., Johnson, R. K., Kastrup, U., Laconte, P., Lange, E., Novak, P., Paavola, J., Reenberg, A., van den Hove, S., et al. (2012). Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy*, 45, 18–23. doi:10.1016/j.enpol.2012.02.051
- Havlik, P., Schneider, U. a., Schmid, E., Böttcher, H., Fritz, S., Skalský, R., Aoki, K., et al. (2011). Global land-use implications of first and second generation biofuel targets. *Energy Policy*, 39(10), 5690–5702. doi:10.1016/j.enpol.2010.03.030
- Heaton, E. A., Dohleman, F. G., Miguez, A. F., Juvik, J. A., Lozovaya, V., Widholm, J., Zobotina, O. A., et al. (2010). Miscanthus : A Promising Biomass Crop. *Advances in Botanical Research*, 56(10). doi:10.1016/B978-0-12-381518-7.00003-0
- Hrsg. (2006). *Energieholzmarkt Bayern. Analyse der Holzpotenziale und der Nachfragestruktur*.
- JRC. (2007). *Well-to-wheels Analysis of future Automotive Fuels and Well-to-tank Report. Version 2c*.
- Khanna, M., Chen, X., Huang, H., & Onal, H. (2011). Supply of Cellulosic Biofuel Feedstocks and Regional Production Pattern. *American Journal of Agricultural Economics*, 93(2), 473–480. doi:10.1093/ajae/aaq119
- Kretschmer, B., & Peterson, S. (2008). Integrating bioenergy into computable general equilibrium models: a survey. *Working Paper No. 1473*.
- Laborde, D. (2011a). *Assessing the land use change consequences of European Biofuel Policies*. Washington, D.C.
- Laborde, D. (2011b). Modelling Land Use Changes in a Global CGE : Assessing the EU biofuel mandates with the MIRAGE-BioF model.
- Laborde, D., Al-riffai, P., & Dimaranan, B. (2010). *Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate. Contract* (pp. 1–123).
- Leontief, W. (1986). *Input-Output Economics* (p. 448). Oxford University Press, USA.
- Long, S. P., Heaton, E. A., Clifton-Brown, J., Voigt, T. B., & Michael, J. B. (2003). Miscanthus for Renewable Energy Generation: European Union Experience and Projections for Illinois. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, (9), 433–451.
- Mailhes. (2007). Les Echos - La recherche sur les biocarburants prend ses quartiers à Berkeley - Archives. Retrieved from <http://archives.lesechos.fr/archives/2007/LesEchos/20073-116-ECH.htm>
- Mola-yudego, B. (2010). Regional Potential Yields of Short Rotation Willow Plantations on Agricultural Land in Northern Europe. *Silva Fennica*, 44(July 2009), 63–76. Retrieved from <http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf441063.pdf>
- Nichols, M. D. (2009). *Proposed Low Carbon Fuel Standard* (Vol. 1, pp. 1–25).
- Nijssen, M., Smeets, E., Stehfest, E., & Vuuren, D. P. (2012). An evaluation of the global potential of bioenergy production on degraded lands. *GCB Bioenergy*, 4(2), 130–147. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01121.x
- OCDE/IEA. (2010). *Sustainable Production of Second-generation biofuels*.
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., & Sombroek, W. G. (1990). *World map of the status of human-induced soil degradation. An Explanatory Note*.
- Richter, G. M., Riche, A. B., Dailey, A. G., Gezan, S. A., & Powlson, D. S. (2008). Is UK biofuel supply from Miscanthus water-limited? *Soil Use and Management*, 24(3), 235–245. doi:10.1111/j.1475-2743.2008.00156.x

- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. a, Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., et al. (2008). Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867), 1238–40. doi:10.1126/science.1151861
- Swinton, S. M., Babcock, B. a., James, L. K., & Bandaru, V. (2011). Higher US crop prices trigger little area expansion so marginal land for biofuel crops is limited. *Energy Policy*, 39(9), 5254–5258. doi:10.1016/j.enpol.2011.05.039
- Taheripour, F., & Tyner, W. E. (2011). Introducing First and Second Generation Biofuels into GTAP Data Base version 7. *GTAP Research Memorandum*, (21).
- Taheripour, F., Tyner, W. E., & Wang, M. Q. (2011). Global Land Use Changes due to the U . S . Cellulosic Biofuel Program Simulated with the GTAP Model. *GTAP paper*.
- Tarka, T. J. (2009). *Affordable , Low-Carbon Diesel Fuel from Domestic Coal and Biomass* (p. 89).
- Tyner, W. E. (2010a). Comparison of the US and EU approaches to stimulating biofuels. *Biofuels*, 1(1), 19–21. doi:10.4155/bfs.09.15
- Tyner, W. E. (2010b). Land Use Changes and Consequent CO2 Emissions due to US Corn Ethanol Production: A Comprehensive Analysis.
- UNICT. (2011). *Future Crops for Food , Feed , Fiber and Fuel. 4F Crops Project. WP2 - Task 2 . 1 Choice of the crops* (pp. 1–32).
- Valin, H., Dimaranan, B., & Bouet, A. (2009). Biofuels in the world markets, 1–41.
- Vierhout, R. (2011). Policy framework for advanced biofuels in Europe The way forward. *epure.org*.
- Yacobucci, B. D., & Bracmort, K. (2010). *Calculation of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions for the Renewable Fuel Standard (RFS)*.

Sitographie

Adresse du site Web	Date de consultation	Nature
http://www.ifpri.org/node/8439	23 Avril 2012	Site de l'IFPRI
http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC53558.pdf	11 Juin 2012	Site du Joint Research Center, institut de recherche de la commission européenne
faostat.fao.org/site/375/default.aspx	9 Juillet 2012	Site web de la FAO
www.eionet.europa.eu/gemet/concept?ns=1&cp=5023	9 Juillet 2012	European Environment Information and Observation Network de l'European Environment Agency (EEA)
stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=1591	9 Juillet 2012	Site de l'OCDE, Glossaire
http://www.caas.net.cn/jijian/UploadFiles/2008313104948159.doc	9 Juillet 2012	Site du Ministère d'Agriculture Chinois
http://www.bloomberg.com/news/2011-12-02/range-fuels-cellulosic-ethanol-plant-fails-as-u-s-pulls-plug.html	20 Juin 2012	Site d'information de l'entreprise privée Bloomberg créée en 1982.
http://biomap.kcl.ac.uk	20 Juin 2012	BIOMAP est un 7th Framework Programme Coordination et un contrat Support Action visant à fournir des informations et une dissémination d'outils pour les biocarburants.
http://climate-connections.org/2012/06/06/clean-technology-us-policy-aids-second-generation-biofuel-push/	13 Juillet 2012	Site d'information du Global Justice Ecology Project qui est le point d'attache américain du Global Forest Coalition (une ONG internationale)
http://www.bizjournals.com/wichita/news/2011/08/19/abengoa-cellulosic-ethanol-Hugoton.html	13 Juillet 2012	The Business Journals est un site d'information destiné à une clientèle d'entreprises privées à la recherche de stratégies de développement.
http://www.ineos.com/new_item.php?id_pres=283	13 Juillet 2012	INEOS est une jeune entreprise privée spécialisée dans les produits pétrochimiques et pétroliers.
http://climate-connections.org/2012/06/06/clean-technology-us-policy-aids-second-generation-biofuel-push/	13 Juillet 2012	Cf. ci-dessus
http://www.chemrec.se/Press-Chemrec.aspx	13 Juillet 2012	Compagnie privée suédoise spécialisée dans le développement de technologies de gazéification des résidus de papeteries (liqueur noire) pour la production de biocarburants.

		(inclut dans le projet de l'UE RENEW/FP6)
http://www.crcao.org/workshops/LCA%20October%202009/Session%205/1-2%20Adams,%20Kevin.pdf	13 Juillet 2012	Workshop document d'Agbengoa Energy, une firme internationale (U.S.) qui produit en partie de l'éthanol cellulosique.
http://www.biogasol.com/BornBioFuel-177.aspx	13 Juillet 2012	Biogasol est une société danoise créée en 2006, spécialisée dans le développement de solutions « énergies renouvelables ».
http://ec.europa.eu/energy/renewables/action_plan_en.htm	03 Juillet 2012	Site de la commission européenne.
http://www.euractiv.fr/durabilite-biocarburants-remise-question-rapport-article	12 Juillet 2012	EurActiv.fr est un journal en ligne, gratuit et indépendant, dédié aux politiques de l'Union Européenne en France.
http://www.novabiom.com/	24 Juillet 2012	Société française créée en 2006, spécialisée en nouvelles biomasses végétales et notamment le Miscanthus pour la production d'énergies.
http://www.fsa.usda.gov/FSA/newsReleases?area=newsroom&subject=landing&topic=pfs&newstype=prfactsheet&type=detail&item=pf_20110503_energ_en_bcapl.html	9 Juillet 2012	Site du Ministère de l'agriculture des Etats-Unis.
http://blogs.worldwatch.org/biofuel-expansion-in-central-america-and-the-myth-of-vacant-land/	12 Juillet 2012	Blog du Worldwatch Institute, Institut de recherche indépendant sur les questions d'environnement au niveau mondial.
http://base.d-p-h.info/en/fiches/dph/fiche-dph-7439.html	03 Juillet 2012	Ce site « ressources » valorisant une base de données d'« expériences » composée de plus de 7500 fiches, articles, etc.
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/agriculture/data/database	30 Juillet 2012	Bases de données EUROSTAT, « agriculture ».
http://www.isric.org/projects/global-assessment-human-induced-soil-degradation-glasod	31 Juillet 2012	Base de données mondiale GLASOD sur la dégradation des sols induite par l'homme.
http://www.oeko-therm.net	28 Juillet 2012	Entreprise privée allemande commercialisant des chaudières à Miscanthus dans toute l'Europe.
http://www.actu-environnement.com/	1 ^{er} Août 2012	Titre de presse d'information professionnelle sur l'Environnement édité par l'entreprise privée Cogiterra.
http://www.cepii.fr/anglaisgraph/workpap/pdf/2007/wp07-15.pdf	31 Mai 2012	Site du CEPII (Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales).



Département : Département d'Economie et de Gestion Rurale

Spécialisation Politiques et Marchés de l'Agriculture et des Ressources

Enseignant responsable : **Mme LAROCHE-DUPRAZ Cathie**

Auteur : **Mlle COULEAU Anabelle**

Organisme d'accueil : **International Food Policy Research Institut (IFPRI)**

Nb pages : 58 Annexes : 10 (46 Pages)

Adresse : 2033 K Street, NW

Année de soutenance : **2012**

20006-1002 Washington, DC

Maître de stage : **M. LABORDE-DEBUCQUET David**

Titre :

Evaluation des impacts de l'utilisation des biocarburants de seconde génération sur les usages des sols. Analyse en équilibre général calculable. *Le cas du miscanthus en Union européenne.*

Résumé : Fin 2012, la Commission européenne devrait livrer son projet législatif sur la question des changements d'allocation des sols indirects. L'intégration de cette composante dans les analyses de cycle de vie viendrait remettre en cause la réduction initialement supposée des GES (Gaz à Effet de Serre) associées aux biocarburants de 1^{ère} génération. Actuellement, les usines pilotes pour les biocarburants de 2^{nde} génération se multiplient rapidement et sont à l'aube de passer à l'étape de commercialisation. Ces nouvelles générations utilisent une biomasse ligno-cellulosique qui n'entre pas en compétition dans la chaîne de production alimentaire. Elles semblent alors plus attractives sur le plan environnemental. Cependant, les facteurs terre et eau peuvent entrer en compétition avec d'autres usages. Cet effet peut remettre en cause l'atout environnemental des 2^{nde} générations lors de la prise en compte des CAS (changement d'allocation des sols). Peu d'études se sont intéressées à cette composante à la fois pour les 1^{ère} et 2^{nde} générations de biocarburants. Ce rapport s'inscrit au cœur d'un projet de l'IFPRI plus large afin d'évaluer la composante CAS. Nous apportons dans notre analyse une méthodologie permettant d'introduire le secteur des biocarburants de 2^{nde} génération dans un modèle d'analyse en équilibre général calculable. D'une part, ce rapport apporte une méthodologie d'ajustement des rendements du Miscanthus, une biomasse ligno-cellulosique ayant un fort potentiel de production en Union Européenne. D'autre part, nous développons une réflexion sur l'introduction du Miscanthus dans la modélisation de l'offre sur deux éléments : le marché de la terre au niveau des mécanismes de réallocation et les technologies de transformation de la biomasse en biocarburant.

Abstract : In 2012, the European Commission is supposed to release legislative proposals on the indirect land use change issue. This component has induced experts to reconsider the expected GHG (GreenHouse Gas) emissions reduction for 1st generation biofuels. Pilot plants are currently breaking the ground in European Union and some of them are planning to start commercial production in 2012. Those new generations are based on ligno-cellulosic biomass which does not compete with food and feed production. That is the reason why 2nd generation might seem more attractive than 1st generation in terms of environmental benefits. However, land and water factors used for 2nd generation biofuels can compete with other uses. Hence, taking into account LUC (Land Use Change) issues might come up against these expected environmental benefits. Few studies analyzed LUC emissions for both 1st and 2nd generation biofuels. This report comes within a global project at IFPRI in order to assess the LUC emissions for 2nd generation. We first provide a methodology to adjust yields for a new ligno-cellulosic biomass « Miscanthus ». Indeed, this dedicated energy crop is expected to have a high potential in biomass production in European countries. We further provide an analysis about how to include Miscanthus based biofuels into supply side. In particular, we develop a methodology on land allocation mechanism and on two conversion technologies of ligno-cellulosic biomass into 2nd generation biofuels.

Mots-clés: seconde génération, biocarburants, changements d'allocation des sols, équilibre general calculable, MIRAGE-BioF, cellulosique, bioénergie, biomasse.

Key Words: second generation, biofuel, Miscanthus, land use change, computable general equilibrium, MIRAGE-BioF, cellulosic, bioenergy, biomass.