



HAL
open science

**Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et internationaux et les changements d'affectation des sols -
Volet 2: Evaluation des effets du développement des biocarburants en France sur les marchés des grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols: une analyse à l'aide du modèle MATSIM-LUCA: résultats des simulations**

Agneta Forslund, Fabrice Levert, Alexandre Gohin, Chantal Le Mouël

HAL Id: hal-01208886

<https://hal.science/hal-01208886>

Submitted on 6 Jun 2020

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

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

► **To cite this version:**

Agneta Forslund, Fabrice Levert, Alexandre Gohin, Chantal Le Mouél. Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et internationaux et les changements d'affectation des sols - Volet 2: Evaluation des effets du développement des biocarburants en France sur les marchés des grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols: une analyse à l'aide du modèle MATSIM-LUCA: résultats des simulations. [Rapport Technique] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. 2013. hal-01208886



ÉTUDE COMPLÉMENTAIRE À L'ANALYSE RÉTROSPECTIVE DES INTERACTIONS DU DÉVELOPPEMENT DES BIOCARBURANTS EN FRANCE AVEC L'ÉVOLUTION DES MARCHES FRANÇAIS ET MONDIAUX ET LES CHANGEMENTS D'AFFECTATION DES SOLS

RAPPORT FINAL :

VOLET 2 : EVALUATION DES EFFETS DU DEVELOPPEMENT DES
BIOCARBURANTS EN FRANCE SUR LES MARCHES NATIONAUX ET
INTERNATIONAUX DES GRANDES CULTURES ET SUR LE
CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS :

UNE ANALYSE A L'AIDE DU MODELE MATSIM-LUCA

RESULTATS DES SIMULATIONS

Mars 2013
Version finale

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par l'INRA (contrat 11-01-C0063)

Auteurs : Agneta Forslund (INRA, SAE2), Fabrice Levert (INRA, UMR-SMART), Alexandre Gohin (INRA, UMR-SMART), Chantal Le Mouël (INRA, UMR-SMART)

Coordination technique :
Bruno Gagnepain, Service Bioressources, Direction Production et Energies Durables
(DEPD) – ADEME (Angers)

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Sommaire

Chapître I. Description des équilibres de marchés observés en France et dans le monde entre 2004 et 2009	9
1. Description des équilibres de marchés observés en France entre 2004 et 2009	9
1.1. Equilibres des marchés des biocarburants	9
1.2. Equilibres des marchés des produits de grandes cultures	10
2. Description des équilibres des marchés mondiaux observés entre 2004 et 2009	19
2.1. Evolution de la demande	19
2.2. Evolution des surfaces cultivées	21
2.3. Evolution des prix mondiaux	23
Chapître II. Résultats de simulations : l'impact du développement des biocarburants en France et dans l'UE	24
1. Définition des scénarios	25
1.1. Quelques données de références	25
1.2. Définition des scénarios analysés	26
1.3. Taille des chocs	27
2. Résultats de simulations des scénarios France	27
2.1. Résultats du scénario biodiesel France (BIODFR)	28
2.2. Résultats du scénario éthanol France (ETHFR)	36
2.3. Résultats du scénario biocarburants France (CARBFR)	41
2.4. Synthèse des résultats de simulation des 3 scénarios contrefactuels français : BIODFR, ETHFR et CARBFR	44
3. Résultats de simulations des scénarios UE	46
3.1. Impacts des 3 scénarios sur les prix mondiaux	46
3.2. Impacts sur les marchés communautaires	47
3.3. Impacts sur les marchés mondiaux	50
3.4. Impacts sur les surfaces cultivées	52
3.5. Synthèse des résultats de simulation des 3 scénarios contrefactuels européens : BIODUE, ETHUE et CARBUE	53
Chapître III. Analyse de sensibilité des résultats à certains paramètres clés du modèle et comparaison avec les résultats d'autres études	57
1. Analyse des résultats en termes de changement d'affectation des sols (CAS) par unité d'énergie	57
2. Analyse de sensibilité des résultats à certains paramètres du modèle	63
2.1. Sélection des valeurs des paramètres	63
2.2. Sensibilité des résultats à chaque paramètre considéré isolément	64
2.3. Simulation Monte Carlo	69
3. Analyse des résultats en termes d'émissions de gaz à effet de serre (facteur CAS)	72
Chapître IV. Complémentarité avec les autres études menées dans le même cadre et quelques perspectives pour des travaux futurs	76
1. Revue critique des études évaluant l'effet des CAS sur les bilans environnementaux des biocarburants (De Cara et al., 2012)	76

2.	Analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les CAS (InNuméri, 2012)	77
3.	Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les CAS (Chakir et Vermont, 2013)	78
4.	Perspectives pour des travaux futurs	80
Annexe A.	Coefficients de transformation utilisés dans les analyses	83
Annexe B.	Repères sur la valeur énergétique et la production de coproduits des principales cultures	84

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les différents postes de consommation des produits de grandes cultures en France en 2009.....	11
Tableau 2: Evolution des surfaces en grandes cultures en France	15
Tableau 3: Evolution de la production de produits de grandes cultures en France	17
Tableau 4: Solde commercial de la France par type de produit de grandes cultures.....	18
Tableau 5 : Principales utilisations de céréales, huiles et cultures sucrières dans le monde en 2009.	19
Tableau 6: Variation des surfaces mondiales en grandes cultures par zone	22
Tableau 7 : Consommation observée de biodiesel (millions de tonnes).....	25
Tableau 8 : Consommation observée d'éthanol (millions de tonnes)	25
Tableau 9 : Définition des chocs simulés pour la France.....	27
Tableau 10 : Définition des chocs simulés pour l'Europe	27
Tableau 11 : Impacts du scénario BIODFR sur les marchés français du biodiesel et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009)	30
Tableau 12 : Impacts du scénario BIODFR sur les surfaces en grandes cultures en France	31
Tableau 13 : Impacts du scénario BIODFR sur les marchés mondiaux du biodiesel et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009).....	33
Tableau 14 : Impacts du scénario BIODFR sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations par rapport à la référence 2009)	35
Tableau 15 : Impacts du scénario BIODFR sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)	36
Tableau 16 : Impacts du scénario ETHFR sur les marchés français de l'éthanol et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009).....	37
Tableau 17 : Impacts du scénario ETHFR sur les marchés mondiaux de l'éthanol et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009).....	39
Tableau 18 : Impacts du scénario ETHFR sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations par rapport à la référence 2009)	40
Tableau 19 : Impacts du scénario ETHFR sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)	41
Tableau 20 : Impacts du scénario CARBFR sur les surfaces en grandes cultures en France (variations en Mha par rapport à la référence 2009).....	42
Tableau 21 : Impacts du scénario CARBFR sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations en Mha par rapport à la référence 2009).....	43
Tableau 22 : Impacts du scénario CARBFR sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)	43
Tableau 23 : Impacts du scénario CARBUE sur les marchés communautaires des biocarburants et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009).....	48
Tableau 24 : Impacts du scénario CARBUE sur les marchés mondiaux des biocarburants et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009).....	51
Tableau 25 : Impacts des scénarios ETHUE, BIODUE et CARBUE sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations par rapport à la référence 2009).....	52
Tableau 26 : Impacts du scénario CARBUE sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)	53
Tableau 27 : CAS issus des différents scénarios simulés	57
Tableau 28 : Changement d'affectations des sols obtenus dans la littérature selon l'origine de la matière première utilisée pour produire le biocarburant (en ha/TEP)	59
Tableau 29 : Décomposition des effets du choc biodiesel BIODFR	61
Tableau 30 : Décomposition des effets du choc ETHFR	62
Tableau 31 : Valeurs des paramètres de MATSIM-LUCA : valeurs de référence (REF) et plage de variation dans l'analyse de sensibilité	64
Tableau 32 : Sensibilité des résultats aux élasticités d'expansion du côté de l'offre	65
Tableau 33 : Sensibilité des résultats à l'élasticité de substitution terre/autres facteurs et intrants agricoles	66
Tableau 34 : Sensibilité des résultats aux élasticités de transformation du côté de l'offre	67
Tableau 35 : Sensibilité des résultats aux élasticités d'expansion du côté de la demande.....	68

Tableau 36 : Sensibilité des résultats aux élasticités de substitution du côté de la demande.....	69
Tableau 37 : Estimation des facteurs CAS obtenus dans les différents scénarios simulés sous différentes hypothèses de conversion cultures/prairies et forêt	73
Tableau 38 : Détail des valeurs moyennes obtenues à l'issue de la simulation Monte Carlo avec distinction des zones où se produisent les CAS	75
Tableau 39 : Comparaison des résultats InNuméri avec ceux de MATSIM-LUCA pour les surfaces déplacées à l'étranger dues au biodiesel en France	78
Tableau 40 : Flux nets de surfaces agricoles et non agricoles vers chaque culture dans l'étude de Chakir et Vermont (2013)	79

Liste des figures

Figure 1 : Evolution de la production et de la consommation de biocarburants en France	10
Figure 2 : Evolution de la production de biocarburants par matière première d'origine en France	10
Figure 3 : Evolution de la demande humaine de produits de grandes cultures en France.....	12
Figure 4 : Evolution de la demande animale de produits de grandes cultures en France.....	12
Figure 5 : Evolution de la demande de matières premières agricoles pour les biocarburants en France	13
Figure 6 : Variation de la demande de matières premières agricoles pour les biocarburants en France	13
Figure 7 : Variation des différentes utilisations de céréales en France.....	13
Figure 8 : Variation des différentes utilisations d'huiles d'oléagineux en France.....	14
Figure 9 : Variation des différentes utilisations de cultures sucrières en France.....	14
Figure 10 : Evolution des surfaces en grandes cultures en France	15
Figure 11 : Evolution des surfaces en céréales en France	16
Figure 12 : Evolution des surfaces en oléagineux en France	16
Figure 13 : Evolution de la production de céréales en France.....	17
Figure 14 : Evolution de la production d'huiles en France	17
Figure 15 : Evolution de la production de cultures sucrières en France	18
Figure 16: Variation du solde commercial de la France	18
Figure 17 : Variation des principales utilisations de céréales dans le monde.....	20
Figure 18 : Variation des principales utilisations d'huiles au niveau mondial	20
Figure 19 : Variation des principales utilisations de cultures sucrières au niveau mondial	21
Figure 20 : Evolution des surfaces mondiales en grandes cultures.....	21
Figure 21 : Evolution des surfaces mondiales en céréales.....	22
Figure 22 : Evolution des surfaces mondiales en oléagineux.....	23
Figure 23 : Evolution des prix mondiaux des produits	23
Figure 24 : Variations des prix mondiaux issues des 3 scénarios contrefactuels France (en % par rapport à la référence 2009)	28
Figure 25 : Echanges nets de biodiesel suite au choc biodiesel France (en Mt).....	29
Figure 26 : Echanges nets d'éthanol suite au choc éthanol France (Mt).....	38
Figure 27 : Variations des prix mondiaux entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels français	44
Figure 28 : Variation des surfaces cultivées en France entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels français	45
Figure 29 : Variation des surfaces cultivées au niveau mondial entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels français	46
Figure 30 : Variations des prix mondiaux issues des 3 scénarios contrefactuels UE (en % par rapport à la référence 2009)	47
Figure 31 : Echanges nets de biodiesel (panel de gauche) et échanges nets d'éthanol (panel de droite) suite au choc CARBUE	50
Figure 32 : Variations des prix mondiaux entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels UE	54
Figure 33 : Variation des surfaces cultivées au niveau mondial entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels UE	55
Figure 34: Distribution de la surface totale déplacée au niveau mondial induite par le scénario BIODFR (verticale rouge = Résultat de référence).....	70
Figure 35 : Distribution de la surface totale déplacée au niveau mondial induite par le scénario ETHFR (verticale rouge = Résultat de référence).....	71
Figure 36 : Surface déplacée au niveau mondial par la consommation/production d'une tonne équivalent pétrole de biodiesel ou d'éthanol en France	72
Figure 37 : Facteur CAS pour le biodiesel et l'éthanol (hypothèse de conversion : 75% prairies/25% forêts).....	74

Introduction

L'objectif de ce rapport est d'analyser les effets du développement des biocarburants en France sur les marchés nationaux et internationaux des grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols. Nous avons étendu notre analyse aux effets du développement des biocarburants en Europe, afin de pouvoir comparer nos résultats de simulations à ceux d'autres études existantes, centrées sur l'évaluation de l'impact de la politique européenne en matière de biocarburants (Al Riffai et al., 2010 et Laborde, 2011, notamment).

Nous conduisons notre analyse à l'aide du modèle MATSIM-LUCA (Market And Trade SIMulation model for Land Use Change Analysis), un modèle d'équilibre partiel centré sur les marchés des grandes cultures et couvrant le monde dans son ensemble. MATSIM-LUCA permet de réaliser des simulations de chocs exogènes, résultant de changements de politiques ou de l'environnement socio-économique, afin d'en étudier les conséquences sur les équilibres de marchés : prix, production, consommation, échanges et, dans cette étude plus spécifiquement, surfaces cultivées et changements d'affectation des sols. Le modèle fait l'objet d'une présentation détaillée dans Forslund et al. (2013b). La base de données du modèle est quant à elle finement décrite dans Forslund et al. (2013a).

Contrairement aux autres études existantes qui travaillent en projection des effets du développement des biocarburants à un horizon plus ou moins lointain (souvent 2020), nous proposons une analyse rétrospective sur la période 2004-2009 qui couvre les années de fort développement de la consommation et de la production de biocarburants en France et en Europe.

Le présent rapport débute par une description des évolutions observées entre 2004 et 2009 sur les marchés des biocarburants d'une part, sur les marchés de grandes cultures d'autre part, en France et dans le monde. Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse des résultats de simulations des scénarios contrefactuels définis pour la France et pour l'Union européenne (UE). Le troisième chapitre compare nos résultats à ceux issus d'autres études existantes et propose une analyse de sensibilité des résultats obtenus à certains paramètres clés du modèle. Le quatrième chapitre conclut en évoquant la complémentarité entre ce travail et ceux menés dans le même cadre par S. De Cara (De Cara et al., 2012), la société In Numéri (In Numéri, 2012) et R. Chakir et B. Vermont (Chakir et Vermont, 2013) d'une part, en traçant quelques perspectives pour les travaux futurs d'autre part.

Chapître I. Description des équilibres de marchés observés en France et dans le monde entre 2004 et 2009

Dans un premier temps, nous décrivons les équilibres des marchés des biocarburants et des matières premières agricoles liées, observés entre 2004 et 2009 en France. Dans un second temps, la même analyse est menée au niveau des marchés internationaux. L'objectif de ce chapitre est double :

- décrire ce qui s'est passé afin de dresser la toile de fond du chapitre suivant qui, lui, tente d'isoler le seul impact du développement des biocarburants ;
- donner au lecteur une idée de l'ampleur des chocs qui sont imprimés dans les simulations contrefactuelles du chapitre suivant.

1. Description des équilibres de marchés observés en France entre 2004 et 2009

Nous décrivons ci-après les différentes évolutions observées en France sur la période d'analyse, en termes de bilan de biocarburants, de demande de produits de grandes cultures considérées dans le modèle, d'offre de produits de grandes cultures, de surfaces cultivées correspondantes et de solde commercial. Nous analysons la plupart des résultats en niveau mais fournissons également les variations en pourcentage afin que le lecteur appréhende plus précisément la taille des chocs imposés lors des simulations des scénarios alternatifs ultérieurs.

1.1. Equilibres des marchés des biocarburants

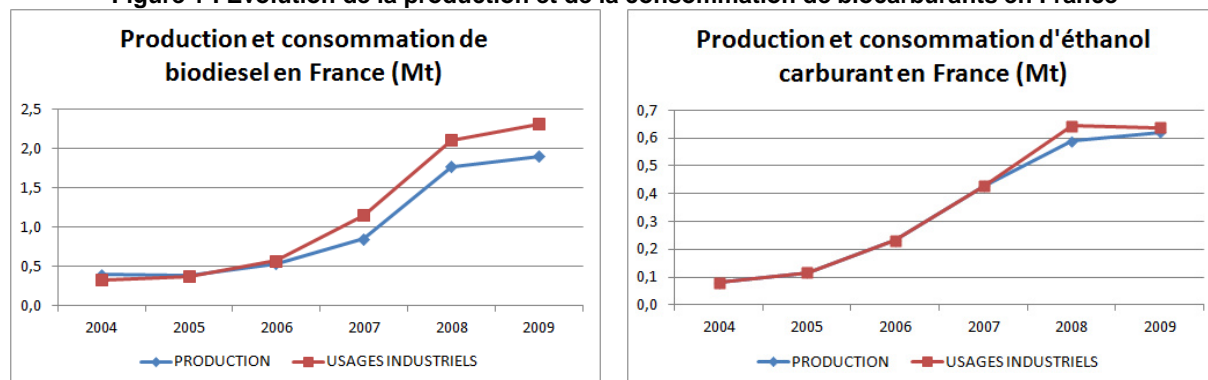
La production et la consommation de biocarburants ont augmenté fortement en France au cours de la période d'étude 2004-2009 du fait de la mise en place des dispositions du plan biocarburants, notamment des objectifs annuels d'incorporation de biocarburants dans les carburants distribués à la pompe.

La Figure 1 indique que de 2004 à 2009, la production française de biodiesel a été multipliée par près de 5, passant de 393 000 tonnes à 1,9 million de tonnes (Mt). La consommation a suivi une tendance à la hausse encore plus marquée puisqu'elle a été multipliée par plus de 7, passant de 324 000 tonnes en 2004 à 2,3 millions de tonnes en 2009. Ainsi, la France est-elle passée d'une situation d'auto-suffisance en 2004-2006 à une situation d'importatrice nette croissante de biodiesel sur la période 2007-2009.

La Figure 1 montre que la production et la consommation française d'éthanol carburant ont suivi les mêmes tendances que celles de biodiesel entre 2004 et 2009, mais partant d'un niveau inférieur. Ainsi la production a-t-elle été multipliée par plus de 6, passant de 80 000 tonnes en 2004 à 620 000 tonnes en 2009, tout comme la consommation qui atteint 636 000 tonnes en 2009. Au final, auto-suffisante en éthanol carburant jusqu'en 2008, la France est devenue légèrement importatrice nette (à hauteur de 15 000 tonnes) en 2009.

Enfin, la Figure 1 suggère un ralentissement de la croissance de la production et de la consommation françaises de biodiesel et de bioéthanol, en fin de période.

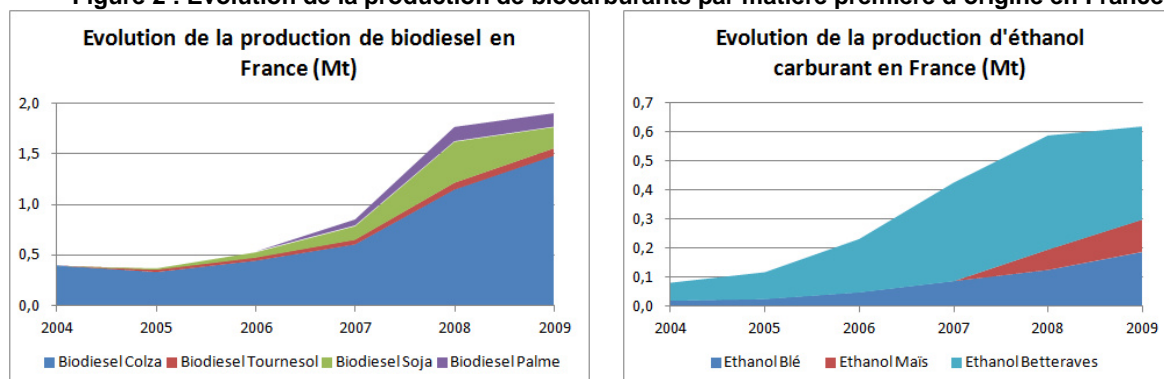
Figure 1 : Evolution de la production et de la consommation de biocarburants en France



La Figure 2 indique que le biodiesel français est composé en majorité de biodiesel fabriqué à partir d'huile de colza. Cette huile qui était à l'origine de la quasi-totalité du biodiesel produit en France en 2004 a progressivement laissé une place croissante aux autres huiles. Ainsi, de 2005 à 2008, la production de biodiesel à base d'huile de soja s'est développée significativement en France, suivie par celle de biodiesel d'huile de palme, et, dans une bien moindre mesure, de celle d'huile de tournesol. En 2009, la production française de biodiesel est constituée à près de 78% de biodiesel de colza, 11% de biodiesel de soja, 7% de biodiesel de palme et 4% de biodiesel de tournesol.

Du côté de l'éthanol, la France produit essentiellement de l'éthanol de betteraves sur toute la période. La Figure 2 indique que, à l'instar du développement de la production de biodiesel, l'essor de la production française d'éthanol carburant a progressivement laissé une place croissante à l'éthanol de blé et à l'éthanol de maïs dont la production démarre en 2007. Ainsi, en 2009, la production française d'éthanol carburant est composée à 52% d'éthanol de betteraves, 30% d'éthanol de blé et 18% d'éthanol de maïs.

Figure 2 : Evolution de la production de biocarburants par matière première d'origine en France



1.2. Equilibres des marchés des produits de grandes cultures

1.2.1 Evolution de la demande

La demande totale de produits de grandes cultures se divise traditionnellement en deux grands postes de consommation : la demande pour l'alimentation humaine et la demande pour l'alimentation animale. Avec le développement de la production de biocarburants est venu s'ajouter un troisième poste de consommation : la demande pour la fabrication de biocarburants. Nous présentons ci-après l'importance relative de chacun de ces trois postes pour chaque type de produit ainsi que leur évolution sur la période d'étude.

Tableau 1 : Les différents postes de consommation des produits de grandes cultures en France en 2009

2009, Mt	CEREALES	GRAINES	HUILES	TOURTEAUX	COPRODUITS	CULTURES SUCRIERES	SUCRE
Alimentation humaine	13,11	0,09	0,91	0	0	0	2,3
Alimentation animale	21,19	0,57	0,21	7,05	0,31	0	0
Usages pour biocarburants	0,96	0	1,96	0	0	4,08	0
Usages industriels	0	6,01	0,06	0	0	33,95	0

Le

Tableau 1 montre que, pour les céréales, le plus gros poste de consommation en France est de loin l'alimentation animale (21,2 Mt en 2009), suivie par l'alimentation humaine (13,1 Mt). La demande de céréales pour la fabrication d'éthanol représente une faible part relativement aux deux autres postes (960 000 tonnes, soit 2,7% de la demande totale française de céréales) et se compose de blé (660 000 tonnes) et de maïs (300 000 tonnes). La fabrication d'éthanol à partir de ces céréales engendre la production de drèches de céréales (coproduits) qui sont entièrement dédiées à l'alimentation animale (310 000 tonnes).

En ce qui concerne les huiles, la fabrication de biocarburants est le poste principal de consommation qui utilise près de 2 Mt d'huiles végétales (soit 62% de la demande totale française d'huiles végétales). Il est suivi par l'alimentation humaine (910 000 tonnes) et l'alimentation animale (210 000 tonnes). Le poste « usages industriels » couvre les utilisations d'huiles végétales par les industries non-alimentaires (savonneries, pharmacie, peintures, lubrifiants, etc.). Il représente une faible part de la demande totale (60 000 tonnes). En 2009, la fabrication de biodiesel, principal poste de consommation des huiles, a utilisé 1,52 Mt d'huile de colza, 218 000 tonnes d'huile de soja, 141 000 tonnes d'huile de palme et 79 000 tonnes d'huile de tournesol.

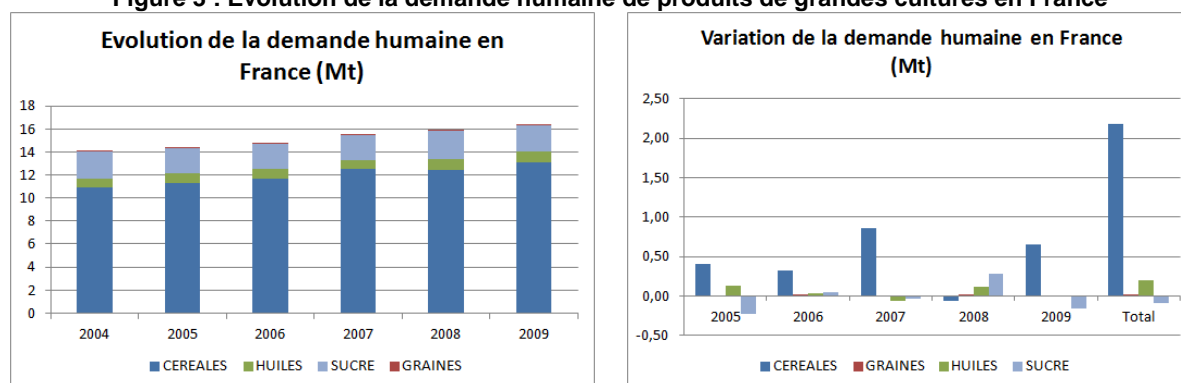
Les graines d'oléagineux sont utilisées dans de faibles proportions en alimentation humaine et en alimentation animale en France. Elles sont destinées en quasi-totalité à la trituration (6 Mt) pour fabriquer de l'huile et des tourteaux.

Les tourteaux d'oléagineux sont utilisés exclusivement en alimentation animale. En 2009, 7 Mt de tourteaux ont été consommés par les animaux en France.

Enfin, les cultures sucrières (principalement les betteraves mais également la canne à sucre originaire des Dom-Tom) sont utilisées principalement pour la production de sucre (34 Mt en usages industriels en 2009). La fabrication d'éthanol carburant est le second poste de consommation avec 4,1 Mt (betteraves) en 2009 soit 11% de la demande totale française de cultures sucrières. Le sucre est quant à lui utilisé exclusivement en alimentation humaine : 2,3 Mt en 2009.

La Figure 3 indique que la demande française de produits de grandes cultures pour l'alimentation humaine a progressé de plus de 2 Mt tous produits confondus entre 2004 et 2009. En quantité, c'est surtout la demande de céréales qui a augmenté (plus de 2 Mt) mais en termes relatifs, c'est la demande d'huiles qui a crû de manière significative (+28% entre 2004 et 2009).

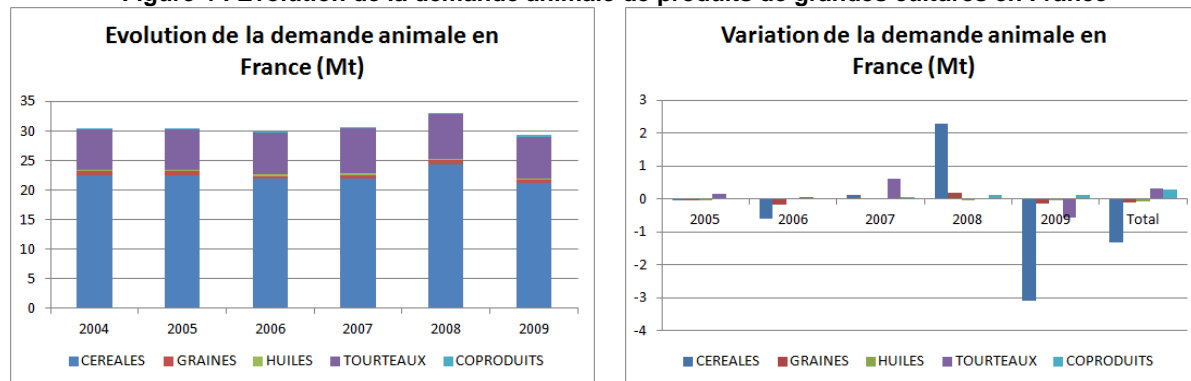
Figure 3 : Evolution de la demande humaine de produits de grandes cultures en France¹



A l'inverse, la Figure 4 montre que la demande française de produits de grandes cultures pour l'alimentation animale a baissé sur la période, tous produits confondus (- 1Mt environ). Nous observons une forte hausse de la consommation animale de céréales en 2008, suivie par un ajustement encore plus marqué à la baisse en 2009. Au total, l'utilisation de céréales en alimentation animale a diminué entre 2004 et 2009, alors que les utilisations de tourteaux et de coproduits de la fabrication d'éthanol ont légèrement augmenté sur la même période.

¹ Comme précédemment, la variation en 2005 correspond à la variation entre 2004 et 2005, la variation en 2006 correspond à la variation entre 2005 et 2006, etc.

Figure 4 : Evolution de la demande animale de produits de grandes cultures en France



L'utilisation de matières premières agricoles pour la production de biocarburants a fortement augmenté en France entre 2004 et 2009 (Figure 5) : plus de 3 Mt de betteraves, plus de 1,5 Mt d'huiles végétales et environ 900 000 tonnes de céréales supplémentaires ont été transformées en biocarburants sur la période. L'évolution des quantités utilisées à des fins énergétiques de ces 3 types de matières premières observée entre 2004 et 2009 suggère une rupture de tendance entre 2007 et 2008. La croissance de la quantité de betteraves transformée en éthanol se ralentit significativement entre 2007 et 2008, cette quantité enregistrant une baisse non négligeable entre 2008 et 2009. Parallèlement la croissance de la quantité d'huiles transformée en biodiesel s'accélère entre 2007 et 2008, puis accuse un ralentissement marqué entre 2008 et 2009. Cette rupture de tendance peut s'expliquer, dans les deux cas, par le ralentissement de l'essor de la production française de biocarburants observé à partir de 2008. En ce qui concerne spécifiquement les betteraves toutefois, on note en plus un phénomène de substitution en faveur des céréales (blé, mais également maïs à partir de 2008) dans la fabrication d'éthanol, qui peut expliquer le repli de l'utilisation de betteraves observée entre 2008 et 2009 (Figure 6).

Figure 5 : Evolution de la demande de matières premières agricoles pour les biocarburants en France

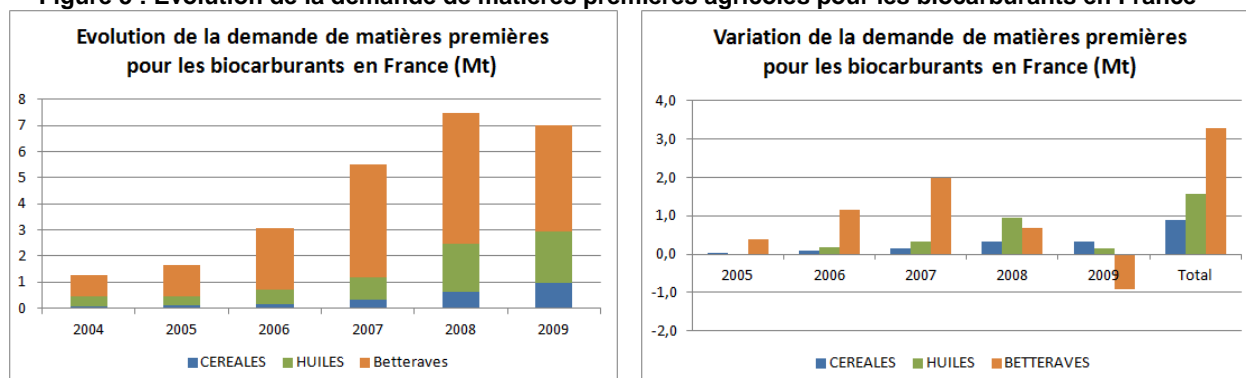
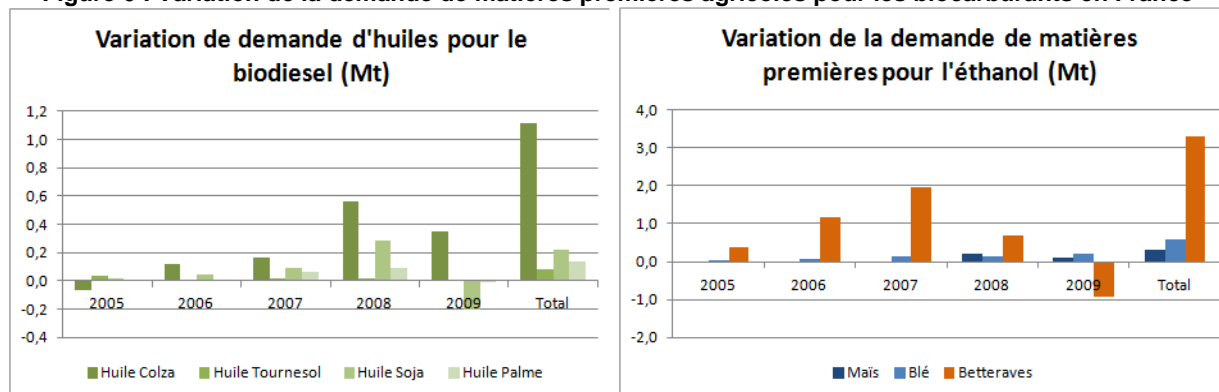


Figure 6 : Variation de la demande de matières premières agricoles pour les biocarburants en France



En guise de synthèse des évolutions observées au niveau de la demande française de produits de grandes cultures, nous présentons ci-après l'évolution sur 2004-2009 des 3 types de demande (humaine, animale, énergétique) sur un même graphique, et ce pour chaque type de produits (céréales, huiles, cultures sucrières). L'idée est ici de donner au lecteur une idée de l'ampleur du rôle de la demande pour la fabrication de biocarburants, par rapport aux deux autres types de demande, au regard de l'évolution historique des marchés français de produits de grandes cultures, une telle image étant d'une grande aide dans la compréhension et l'analyse des résultats des simulations contrefactuelles qui font l'objet du chapitre suivant.

Figure 7 : Variation des différentes utilisations de céréales en France

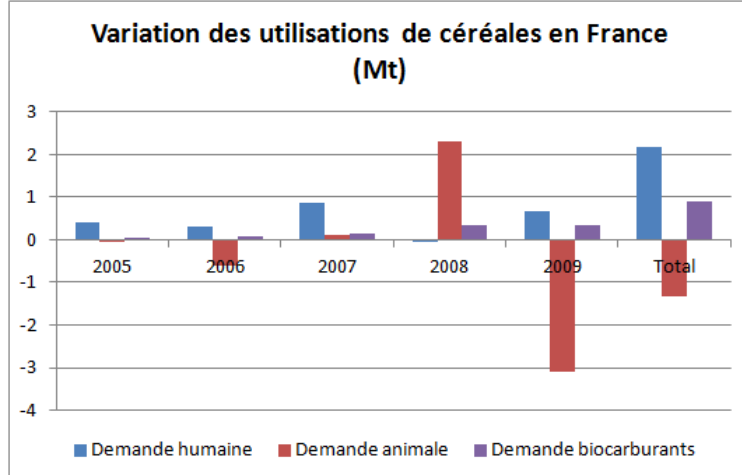


Figure 8 : Variation des différentes utilisations d'huiles d'oléagineux en France

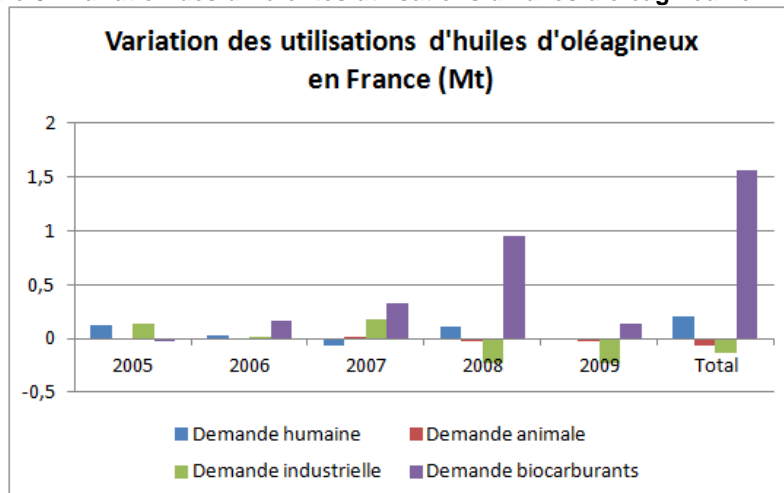
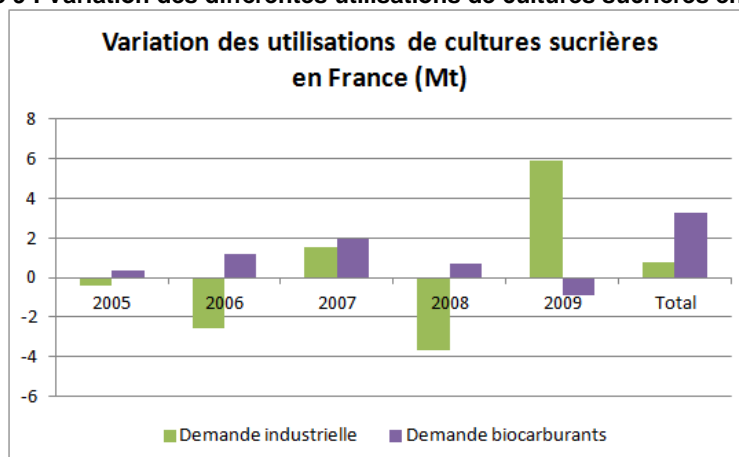


Figure 9 : Variation des différentes utilisations de cultures sucrières en France



La Figure 7 indique clairement que, pour les céréales, c'est la demande humaine qui a été le moteur principal de l'accroissement observé de la demande globale française. La demande de céréales pour la fabrication de biocarburants a augmenté de manière continue sur la période, contribuant positivement également à l'accroissement de la demande totale, mais avec un poids bien inférieur à la demande humaine. La demande animale a quant à elle évolué de manière très erratique, alternant les années de hausse et de baisse, pour finalement aboutir à une contribution négative sur la période.

En ce qui concerne les huiles végétales, c'est la demande pour la production de biodiesel qui a imprimé la croissance de la demande globale française observée sur la période 2004-2009. Cette demande a augmenté sur toute la période, même si elle a enregistré un ralentissement très marqué entre 2008 et 2009. Les autres demandes (humaine, industrielle, animale) ont connu une évolution assez erratique, alternant des hausses et des baisses selon les années. Au total, la demande humaine a augmenté sur la période tandis que les demandes industrielle et animale ont diminué (Figure 8).

Enfin, de 2004 à 2007, c'est la demande pour la production d'éthanol qui a mené la croissance de la demande de betteraves observée en France. La demande industrielle pour la production de sucre a elle évolué de manière très irrégulière d'une année à l'autre pour aboutir à une hausse sur la période, bien inférieure à celle enregistrée par la demande pour la production d'éthanol (Figure 9).

1.2.2 Evolution de l'offre

Nous décrivons d'abord l'évolution des surfaces cultivées en produits de grandes cultures, puis l'évolution des quantités produites. Le lecteur intéressé peut alors en déduire l'évolution des rendements à l'hectare de chaque produit ou groupe de produits.

La France dispose d'environ 12 millions d'hectares (Mha) cultivés et récoltés en grandes cultures. En 2009, pour ce qui est des grandes cultures considérées dans cette étude, cette surface se décomposait en 9,25 Mha de céréales, 2,25 Mha de graines oléagineuses, 415 000 ha de cultures sucrières (dont 375 000 en betteraves) et 114 000 ha en pois protéagineux (cf. Tableau 2).

Cette surface en grandes cultures a très faiblement évolué en France sur la période 2004-2009 : elle a plutôt diminué en début de période pour croître à nouveau à partir de 2007 et dépasser très faiblement son niveau initial en fin de période. Au total, la surface totale en grandes cultures (pour les produits concernés ici) est passée de 11,93 Mha en 2004 à 12,03 Mha en 2009.

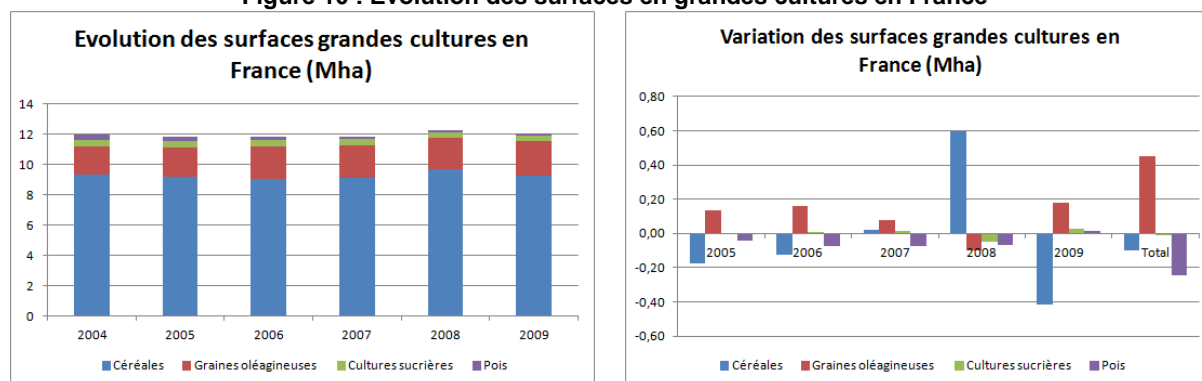
Tableau 2: Evolution des surfaces en grandes cultures en France

France, Mha	Céréales	Graines oléagineuses	Cultures sucrières	Pois	Total
2004	9,35	1,8	0,426	0,358	11,93
2005	9,18	1,935	0,419	0,316	11,85
2006	9,05	2,096	0,42	0,241	11,81

2007	9,07	2,171	0,434	0,165	11,84
2008	9,67	2,073	0,387	0,1	12,23
2009	9,25	2,25	0,415	0,114	12,03

Le Tableau 2: Evolution des surfaces en grandes cultures en France et la Figure 10 : Evolution des surfaces en grandes cultures en France indiquent que la surface en céréales a eu tendance à diminuer jusqu'en 2006, puis est repartie à la hausse jusqu'en 2008 pour se réajuster à la baisse en 2009. Au total, la surface française en céréales est passée de 9,35 Mha en 2004 à 9,25 Mha en 2009. La surface en graines oléagineuses a connu l'évolution inverse : elle a augmenté de manière soutenue jusqu'en 2007, puis a accusé une baisse en 2008 pour repartir à la hausse en 2009. La surface en cultures sucrières est restée relativement stable même si elle a alterné de faibles hausses et de faibles baisses d'une année à l'autre. Au total, la surface française en cultures sucrières est passée de 426 000 ha en 2004 à 415 000 ha en 2009 (la réduction étant entièrement imputable à la surface en betteraves, celle en canne étant restée stable sur la période). Enfin, la surface en pois protéagineux s'est réduite de manière continue sur la période, la baisse s'accroissant significativement en milieu de période. La surface française en pois protéagineux a ainsi diminué de 358 000 ha en 2004 à 114 000 ha en 2009.

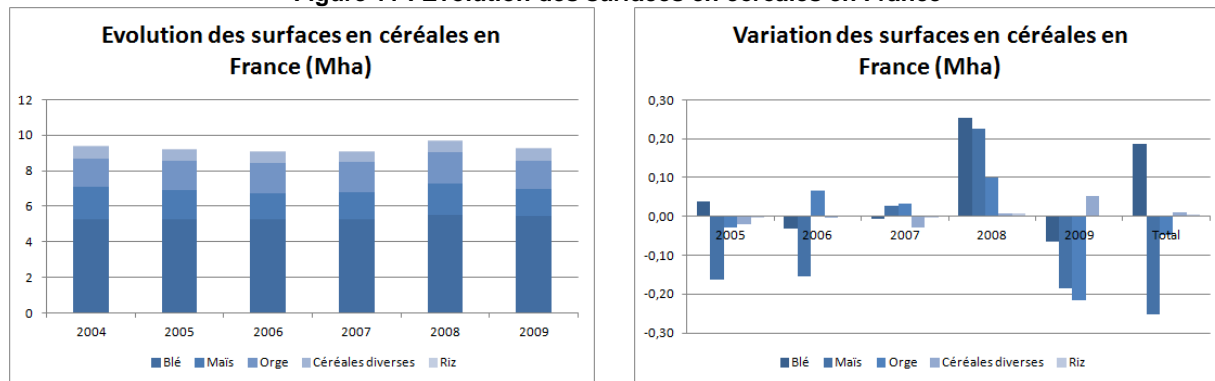
Figure 10 : Evolution des surfaces en grandes cultures en France



Au cours de la période, nous observons une évolution assez symétrique entre les surfaces en graines oléagineuses et les surfaces en céréales. En effet, les surfaces oléagineuses augmentent tous les ans, à l'exception de 2008, alors que les surfaces céréalières diminuent au cours de la période à l'exception de 2008 (et de 2007 mais dans une bien moindre mesure). Au total sur la période 2004-2009, seules les surfaces en graines oléagineuses augmentent (+450 000 hectares) alors que les surfaces en céréales et surtout celles en pois s'ajustent à la baisse (respectivement, -100 000 et -240 000 hectares au total). Dans ce qui suit, nous détaillons uniquement l'évolution des surfaces en céréales et oléagineux.

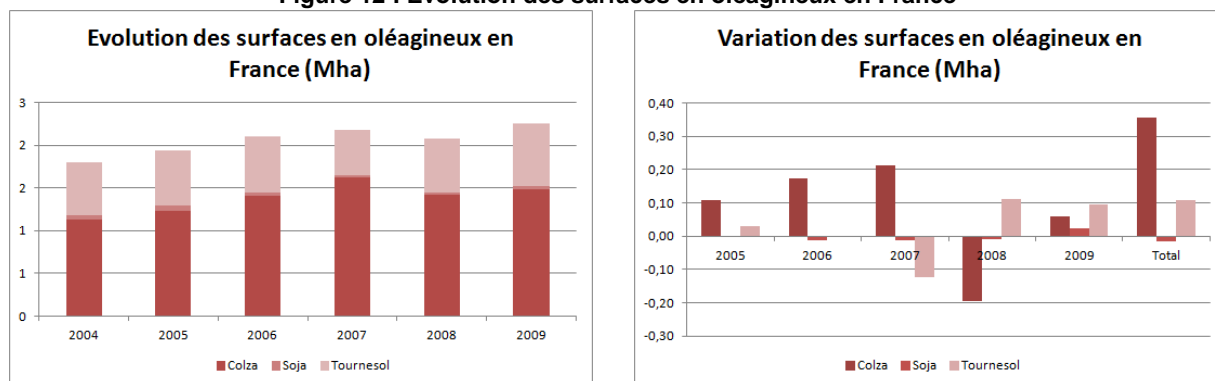
La surface cultivée en céréales en France est passée de 9,35 Mha en 2004 à 9,25 Mha en 2009. La Figure 11 montre que cette diminution est principalement due à un fort ajustement à la baisse des surfaces en maïs et orge (-250 000 et -50 000 ha, respectivement), tandis que la surface en blé a augmenté (+190 000 ha, augmentation presque entièrement enregistrée entre 2007 et 2008). Nous observons une forte expansion de toutes les surfaces céréalières entre 2007 et 2008, évolution cohérente avec le contexte d'augmentation des prix agricoles en 2007 et 2008. Un ajustement à la baisse s'opère toutefois dès 2009 pour toutes les surfaces céréalières, excepté celle des céréales diverses.

Figure 11 : Evolution des surfaces en céréales en France



La surface en oléagineux a augmenté entre 2004 et 2009, passant de 1,8 à 2,25 Mha (+450 000 ha). La Figure 12 indique que cet ajustement à la hausse est surtout imputable à une augmentation de la surface en colza (+360 000 ha) et, dans une moindre mesure, de la surface en tournesol (+110 000 ha). La surface en soja enregistre quant à elle une légère baisse sur la période (-20 000 ha). La surface en colza augmente fortement sur la période 2005-2007, puis accuse une baisse substantielle en 2008, l'année de la forte expansion des surfaces céréalières.

Figure 12 : Evolution des surfaces en oléagineux en France



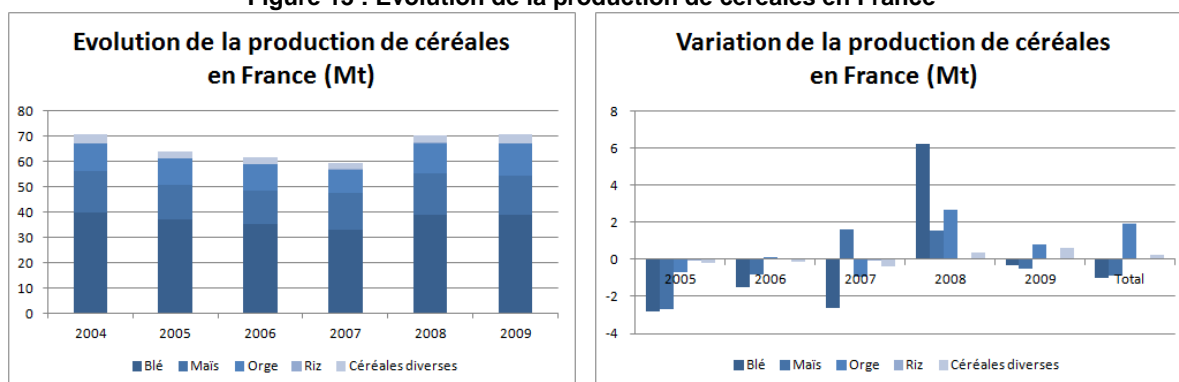
Comme le rapporte le Tableau 3, la France a produit plus de 70 Mt de céréales et plus de 7 Mt de graines d'oléagineux en 2009. La transformation d'une partie de ces céréales en éthanol a généré 310 000 tonnes de drêches de céréales. Les graines oléagineuses domestiques (auxquelles il faut ajouter les importations nettes françaises de graines) ont quant à elles donné lieu à la production de 2,5 Mt d'huiles et de plus de 3 Mt de tourteaux. La France a aussi produit 38 Mt de cultures sucrières en 2009, qui (avec les importations nettes françaises correspondantes) ont servi à fabriquer 4,2 Mt de sucre (ainsi qu'une certaine quantité d'éthanol).

Tableau 3: Evolution de la production de produits de grandes cultures en France

France, Mt	CEREALES	GRAINES	HUILES	TOURTEAUX	COPRODUITS	CULTURES SUCRIERES	SUCRE
2004	70,5	5,6	1,35	1,94	0,02	33,95	4,44
2005	64,05	6,19	1,49	2,01	0,02	33,91	4,41
2006	61,69	5,71	1,49	2,12	0,05	32,49	3,95
2007	59,38	6,09	1,67	2,28	0,09	36,01	3,89
2008	70,24	6,38	2,26	2,99	0,2	33,04	3,78
2009	70,78	7,42	2,56	3,06	0,31	38,04	4,23

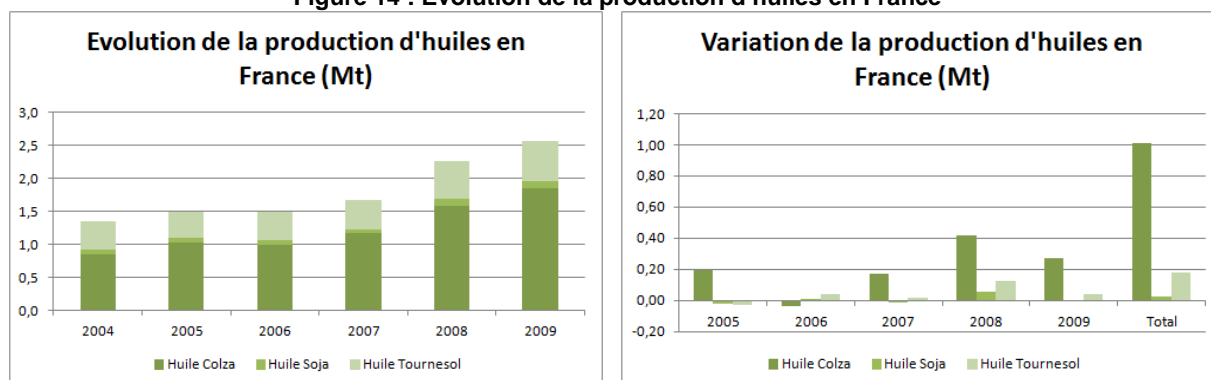
La production française de céréales est restée relativement stable sur la période : elle a diminué entre 2004 et 2007, suivant en cela l'évolution des surfaces et en raison de rendements en baisse, pour repartir à la hausse en 2008, grâce à un accroissement des surfaces et à des rendements favorables, et se stabiliser en 2009, en dépit de la réduction des surfaces compensée par des rendements en hausse. Cette évolution générale concerne toutes les céréales. On note une exception toutefois : l'accroissement de la production de maïs observée entre 2006 et 2007, due essentiellement à une augmentation des rendements (Figure 13).

Figure 13 : Evolution de la production de céréales en France



La production française d'huiles d'oléagineux a presque doublé entre 2004 et 2009 passant de 1,35 Mt toutes huiles confondues à 2,56 Mt. Cette augmentation concerne surtout la production d'huile de colza, avec un accroissement très marqué entre 2007 et 2008 (Figure 14). La surface en colza marquant une contraction cette année-là en France, l'augmentation substantielle observée de la quantité d'huile produite suggère un recours accru aux graines de colza importées. Nous verrons plus loin qu'en effet les importations françaises de graines de colza sont passées de 288 000 tonnes en 2007 à 921 000 tonnes en 2008.

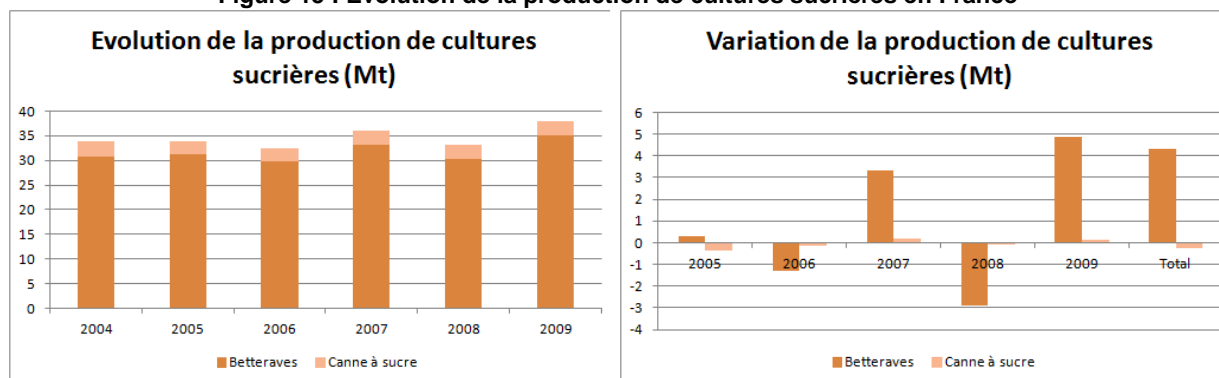
Figure 14 : Evolution de la production d'huiles en France



La production française de cultures sucrières est passée de 34 Mt en 2004 (dont 30,8 Mt de betteraves et 3,1 Mt de canne à sucre) à 38 Mt (dont 35,2 Mt de betteraves et 2,9 Mt de canne à sucre) en 2009 (Figure 15). Cet accroissement de production ne s'est pas traduit en une augmentation de la production de sucre qui est passée de 4,4 Mt en 2004 à 4,2 Mt en 2009, mais en une

augmentation de la production d'éthanol. En dépit d'une augmentation des rendements, la production française de betteraves a fortement diminué entre 2007 et 2008, suite à la réduction de la surface cultivée, observée cette même année. Entre 2006 et 2007 et entre 2008 et 2009, la production française de betteraves augmente grâce à des rendements favorables et une expansion de la surface cultivée. L'évolution de la production de canne à sucre est, elle, entièrement due à l'évolution des rendements, la surface cultivée restant stable sur toute la période.

Figure 15 : Evolution de la production de cultures sucrières en France



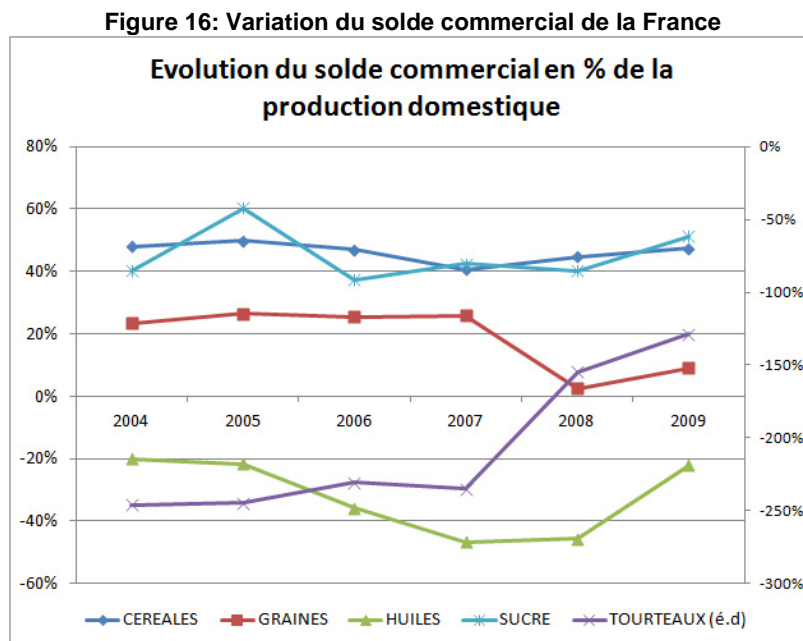
1.2.3 Evolution des échanges

Le Tableau 4 et la

Figure 16 rapportent les soldes commerciaux de la France par type de produits de grandes cultures et leur évolution entre 2004 et 2009.

Tableau 4: Solde commercial de la France par type de produit de grandes cultures

Mt	CEREALES	GRAINES	HUILES	TOURTEAUX	SUCRE
2004	33,84	1,31	-0,27	-4,78	1,78
2005	31,96	1,64	-0,32	-4,92	2,66
2006	29,03	1,45	-0,54	-4,88	1,48
2007	24,14	1,57	-0,78	-5,35	1,65
2008	31,46	0,16	-1,03	-4,62	1,52
2009	33,53	0,67	-0,57	-3,95	2,17



La France est largement excédentaire en céréales (33,5 Mt en 2009) et en sucre (2,2 Mt en 2009), exportant environ la moitié de sa production. Elle est aussi excédentaire en graines d'oléagineux même si le solde commercial en graines a tendance à diminuer en fin de période (supérieur à l'équivalent de 20% de la production domestique jusqu'à 2007, puis environ 10% en 2009).

En revanche, la France est très déficitaire en tourteaux (importatrice nette à hauteur de l'équivalent de 130% de sa production en 2009), même si cette position s'améliore sur la période. Elle est également déficitaire en huiles oléagineuses, le déficit ici s'étant largement accru entre 2006 et 2008 (pour atteindre 46% de la production nationale en 2008), pour se réajuster à la baisse en 2009 (22% de la production nationale en 2009).

2. Description des équilibres des marchés mondiaux observés entre 2004 et 2009

Nous décrivons ici l'évolution des différents postes de demande, des surfaces cultivées et des prix au niveau mondial pour chaque type de produits de grandes cultures, observée entre 2004 et 2009.

2.1. Evolution de la demande

Le Tableau 5 rapporte les quantités mondiales de céréales, d'huiles et de cultures sucrières réparties entre les 4 grands postes d'utilisation : humaine, animale, industrielle, pour la fabrication de biocarburants, pour l'année 2009.

Tableau 5 : Principales utilisations de céréales, huiles et cultures sucrières dans le monde en 2009

Utilisations en 2009 (Mt)	CEREALES	HUILES	CULTURES SUCRIERES
Alimentation humaine	1318,3	102,7	148,5
Alimentation animale	770,5	1,2	18,5
Utilisation industrielle	13,2	19	1366,6
Utilisation pour biocarburants	101,1	14,1	309,8

Nous observons que, pour les céréales, le premier poste d'utilisation est de loin la demande humaine² (contrairement à la France où c'est la demande animale qui domine) : elle a absorbé plus de 1,3

² A noter que la demande humaine est un poste résiduel pour les céréales qui regroupe également les semences et les pertes.

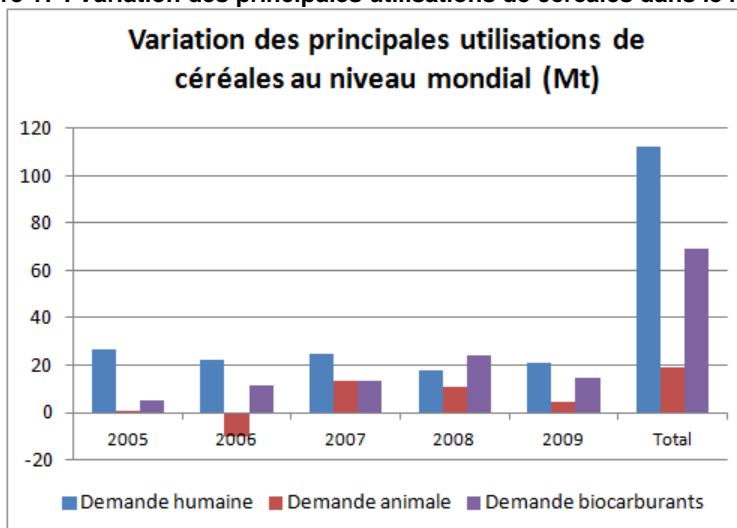
Milliard de tonnes de céréales en 2009. Le deuxième poste d'utilisation est l'alimentation animale avec 771 Mt consommées en 2009. Les céréales utilisées pour la production de biocarburants représentent la même année un peu plus de 100 Mt soit moins de 5% de la quantité totale mondiale de céréales consommée.

Le premier poste d'utilisation d'huiles végétales est également la demande humaine (là encore contrairement à la France où c'est la demande pour la fabrication de biocarburants qui domine) qui représente près de 103 Mt dans le monde en 2009. La demande industrielle (utilisation pour la cosmétique, peinture, pharmacie...) arrive loin derrière avec 19 Mt d'huiles utilisées, suivie par la demande pour la production de biocarburants qui représente en 2009 14 Mt, soit environ 10% de la quantité totale mondiale d'huiles consommée.

La demande industrielle (pour la transformation en sucre) est de loin le plus grand poste d'utilisation de cultures sucrières au niveau mondial : en 2009, elle compte pour près de 1,4 Milliard de tonnes. Le deuxième poste d'utilisation, suivant de très loin, est l'utilisation pour la production de biocarburants, qui absorbe 310 Mt de canne et de betteraves à sucre au niveau mondial en 2009, soit environ 17% de la quantité totale mondiale de cultures sucrières consommée.

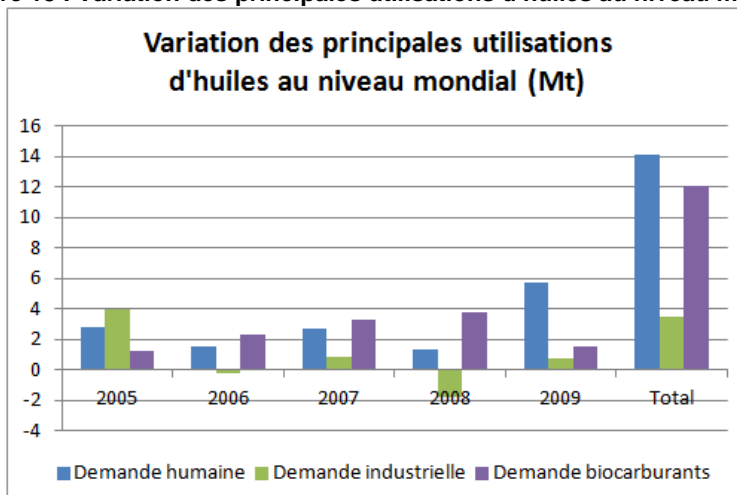
La Figure 17 révèle que c'est la demande humaine qui a été le principal moteur de la croissance de la demande mondiale de céréales sur la période 2004-2009 : elle a augmenté de 112 Mt toutes céréales confondues. La demande de céréales pour la fabrication de biocarburants a été le second poste contributeur à la croissance de la demande mondiale de céréales, avec un accroissement de presque 70 Mt sur la période.

Figure 17 : Variation des principales utilisations de céréales dans le monde



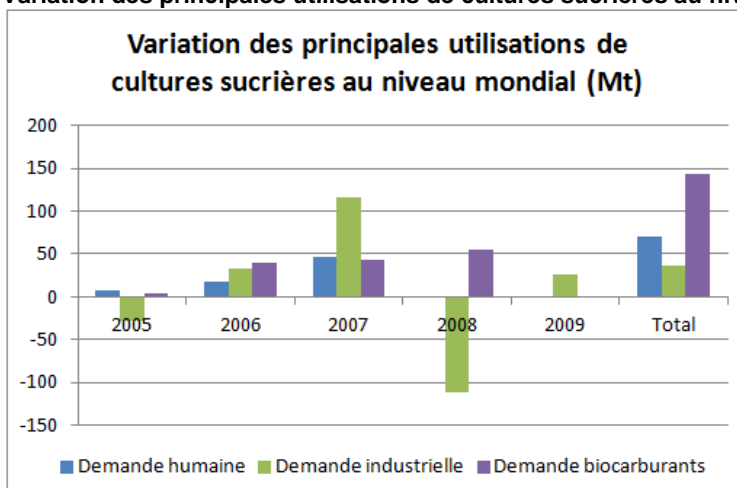
La demande humaine a également été le moteur principal de la croissance de la demande mondiale d'huiles observée entre 2004 et 2009 : + 14 Mt. Mais, dans ce cas, elle est suivie de près par la demande pour la fabrication de biocarburants qui augmente de 12 Mt sur la période. La Figure 18 indique qu'entre 2006 et 2008 la demande d'huiles pour la production de biocarburants a augmenté plus fortement que la demande humaine au niveau mondial. Mais le passage de 2008 à 2009 marque une rupture dans l'évolution de la demande à destination des biocarburants qui accuse un fort ralentissement, tandis que la demande humaine voit sa croissance s'accroître significativement.

Figure 18 : Variation des principales utilisations d'huiles au niveau mondial



Enfin, en ce qui concerne les cultures sucrières, c'est la demande pour la production de biocarburants qui a été le principal moteur de la croissance de la demande mondiale : cette demande a augmenté continuellement sur la période, totalisant un surcroît de 150 Mt entre 2004 et 2009 (Figure 19).

Figure 19 : Variation des principales utilisations de cultures sucrières au niveau mondial



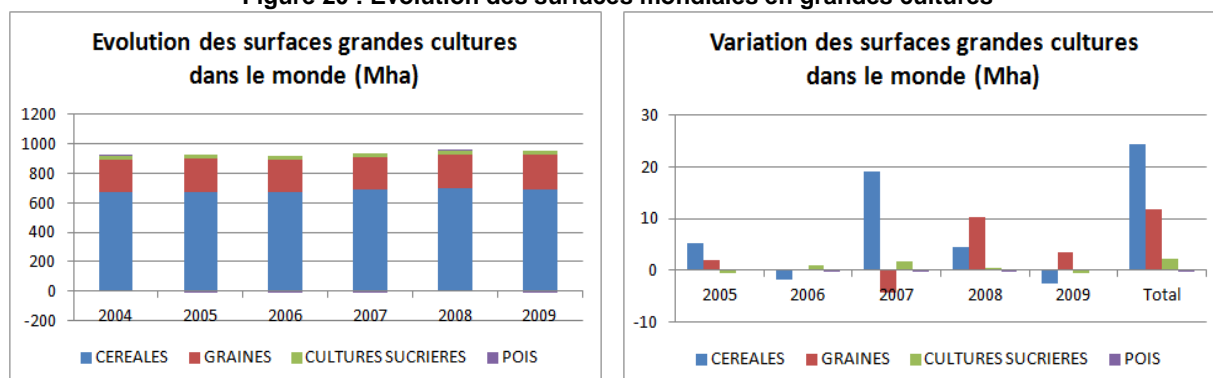
2.2. Evolution des surfaces cultivées

La surface mondiale totale en grandes cultures se répartit principalement entre céréales (environ 73% de la surface totale sur la période), cultures oléagineuses (environ 24% de la surface totale) et cultures sucrières (environ 3% de la surface totale, dont 80% en canne à sucre). La surface en pois protéagineux représente quant à elle moins de 1% de la surface totale mondiale en grandes cultures sur la période 2004-2009.

La surface mondiale en grandes cultures a augmenté de 38 Mha au cours de la période d'étude, passant de 921 Mha en 2004 à 959 Mha en 2009 (Figure 20). Cette augmentation est imputable, en premier lieu, à l'accroissement de la surface en céréales (+24 Mha sur la période) et, dans une moindre mesure, à l'accroissement de la surface en graines oléagineuses (+11,7 Mha). Les cultures sucrières ont également accru leur surface sur la période (+2,3 Mha) tandis que le pois voyait sa surface diminuer (- 126 000 ha).

Notons ici que l'augmentation de la surface totale mondiale en grande cultures, observée entre 2004 et 2009, s'est opérée principalement sur les campagnes 2006/2007 et 2007/2008, qui correspondent aux années au cours desquelles les prix des matières premières agricoles ont été exceptionnellement élevés.

Figure 20 : Evolution des surfaces mondiales en grandes cultures



Le Tableau 6 ventile l'évolution de la surface totale mondiale en grandes cultures, observée entre 2004 et 2009, entre pays et régions de la nomenclature du modèle MATSIM-LUCA. Il en ressort que sur la totalité de la période d'étude, trois zones ont connu une augmentation particulièrement forte de leur surface en grandes cultures : l'Ex Urss (+10,8 Mha), l'Afrique sub-saharienne (+9,8 Mha) et la Chine (+8,3 Mha), cependant l'Asie du sud-est et le Brésil connaissaient également des expansions significatives (+3,6 Mha et +2,6 Mha, respectivement).

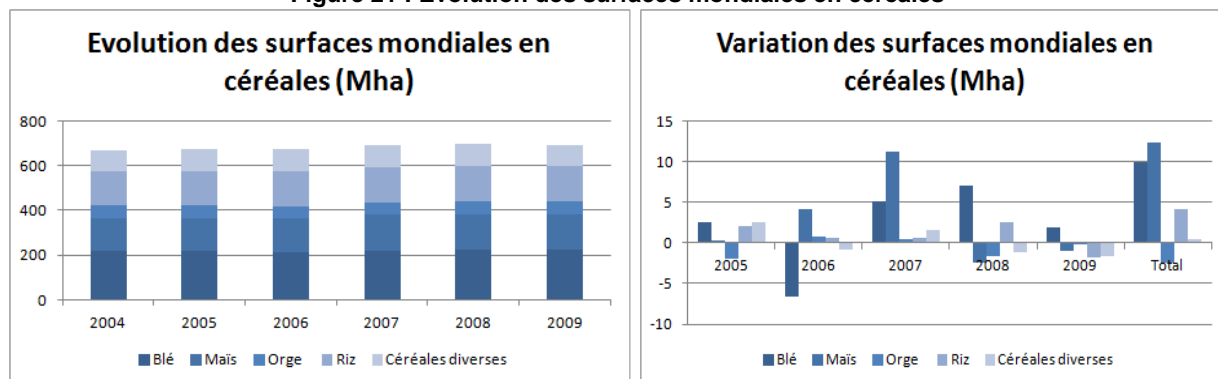
Tableau 6: Variation des surfaces mondiales en grandes cultures par zone

Variations en Mha par rapport à l'année précédente	2005	2006	2007	2008	2009	Total
USA	-0,1	-3,5	4	2,3	-2,6	0
CANADA	0,2	0,2	1,4	0,7	-1,5	1
BRESIL	-0,9	-0,4	1,8	1,3	0,8	2,6
ARGENTINE	-0,4	2,8	1,3	-3,3	1,1	1,4
ASIE DU SUD-EST	0,6	1	1,1	1,2	-0,2	3,6
ASIE DU SUD	0,7	-0,5	2,6	2,3	-3,7	1,4
CHINE	2,1	1	0,6	2,4	2,2	8,3
AFRIQUE SUBSAHARIENNE	5,2	2	-0,5	1,9	1,1	9,8
ASIE DE L'EST	0	0	0	0	0	-0,2
AFRIQUE DU NORD	-0,9	0,2	-0,7	0	1,5	0,1
THAÏLANDE	0,2	-0,1	0,6	0,1	0	0,8
AUSTRALIE	-1,5	-1,2	2,2	1,1	-0,8	-0,3
MEXIQUE	-1,1	0,7	0,3	0,2	-1,4	-1,3
PAYS DE L'EX URSS	1,9	0,1	-0,4	7,9	1,3	10,8
FRANCE	-0,1	0	0	0,4	-0,2	0,1
UE hors France	-0,7	-1,5	0,5	2,4	-1	-0,3
RESTE DU MONDE	2	-1,5	1,5	-5,7	3,9	0,2
TOTAL MONDE	7,1	-0,8	16,2	15,1	0,6	38,2

La Figure 21 indique qu'au niveau mondial, les surfaces en céréales sont principalement dédiées au blé (33% environ des surfaces céréalières dans le monde en 2009). Le riz et le maïs occupent, respectivement, 22 et 23% de ces surfaces en 2009, tandis que l'orge et les céréales diverses en occupent environ 8 et 14%, respectivement.

La croissance des surfaces céréalières, observée dans le monde entre 2004 et 2009, est principalement imputable au blé et au maïs qui voient leur surface augmenter de +10 et +12,3 Mha respectivement. Mais la surface en riz augmente également (+4,2 Mha) ainsi que celle en céréales diverses (+426 000 ha). L'orge est la seule céréale qui voit sa surface diminuer au niveau mondial sur la période (-2,5 Mha).

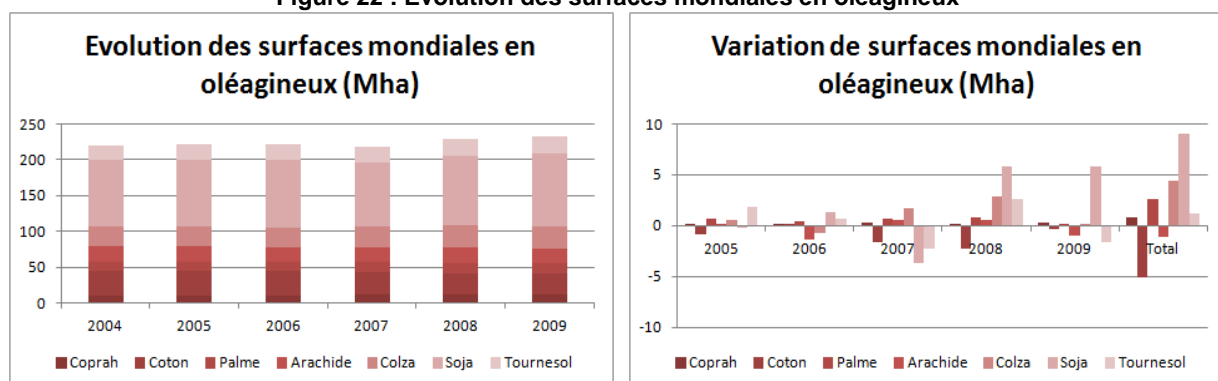
Figure 21 : Evolution des surfaces mondiales en céréales



Les surfaces mondiales en oléagineux sont dominées par la culture de soja, qui représente 44% des surfaces en 2009. Le reste se partage entre colza (13% des surfaces en 2009), coton (13% des surfaces), tournesol (10% des surfaces), arachide (9%), palme (6%) et coprah (5%).

La surface mondiale en oléagineux a légèrement augmenté sur la période, passant de 220 Mha en 2004 à 232 Mha en 2009 (Figure 22). La forte augmentation de la surface en soja (+9 Mha sur la période) et, dans une moindre mesure, des surfaces en colza (+4,4 Mha) et en palme (+2,6 Mha) a en effet été partiellement compensée par la baisse significative de la surface en coton (-5 Mha sur la période).

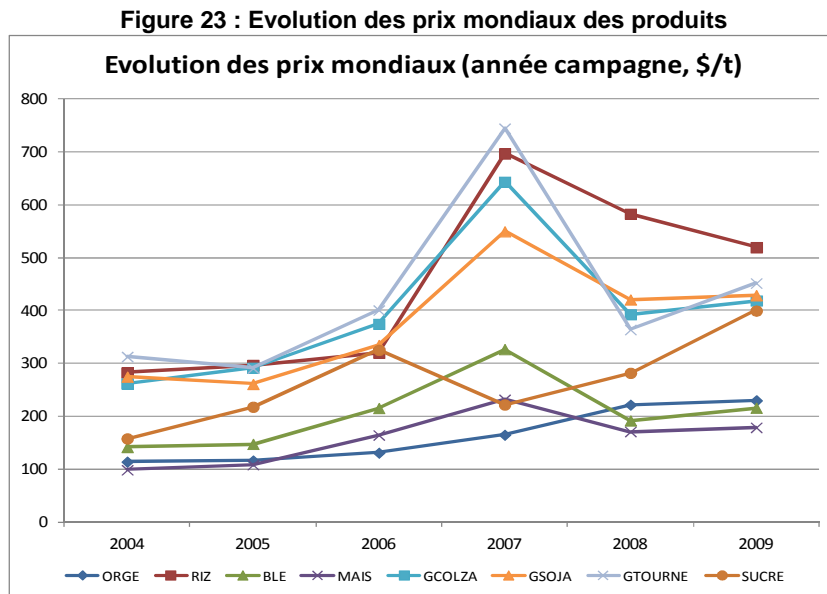
Figure 22 : Evolution des surfaces mondiales en oléagineux



2.3. Evolution des prix mondiaux

Les prix mondiaux des matières premières agricoles ont traversé une période particulièrement chaotique entre 2004 et 2009. Une conjonction de facteurs conjoncturels dans un contexte tendanciel tendu (en termes d'offre et de stocks) a conduit à une augmentation généralisée des prix agricoles à partir de 2006 résultant en un pic au cours de l'année de campagne 2007/2008. Le retour brutal à des niveaux plus normaux à partir de 2008, n'a été que temporaire car certains prix ont de nouveau augmenté à partir de 2009 (année de campagne 2009/2010).

Certains prix ont connu une évolution différente du contexte général résumé ci-dessus, le prix du sucre a été en avance dans le calendrier. Son pic a eu lieu en 2006 et il a enregistré une baisse en 2007. Le prix de l'orge n'a cessé d'augmenter au cours de la période d'étude, mais de manière beaucoup moins marquée que les prix des autres produits.



Chapître II. Résultats de simulations : l'impact du développement des biocarburants en France et dans l'UE

Pour évaluer l'impact du développement des biocarburants en France sur les marchés français et internationaux des grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols, nous proposons de comparer la situation observée de ces marchés en 2009 à la situation qui aurait prévalu la même année si la consommation française de biocarburants n'avait pas évolué comme elle l'a fait mais était restée à son niveau de 2004. Ce faisant, nous sommes en mesure d'évaluer la contribution spécifique du développement de la consommation de biocarburants en France entre 2004 et 2009 sur la situation des marchés en 2009 et sur le changement d'affectation des sols entre 2004 et 2009.

Nous soulignons dès à présent la petite difficulté d'entrée dans l'analyse des résultats pour le lecteur, difficulté due au fait que la littérature existante nous a plutôt habitués à comparer une situation de référence avec une situation caractérisée par un accroissement de la production ou de la consommation de biocarburants dans diverses régions du monde, alors que nos résultats doivent « se lire à l'envers » puisqu'ils comparent la situation observée avec une situation hypothétique caractérisée par une réduction de la consommation de biocarburants.

L'objet de cette étude étant d'évaluer l'impact du développement des biocarburants en France, nous aurions pu nous limiter à des scénarios centrés sur la France. Nous avons souhaité étendre l'analyse à l'Union européenne (UE) dans son ensemble pour, au moins, 2 raisons :

- examiner la réponse du modèle MATSIM-LUCA à des chocs d'ampleur plus importante ;
- pouvoir comparer nos résultats à ceux d'autres études existantes, le plus souvent centrées sur l'UE plutôt que sur la France.

Dans la première section, nous décrivons les scénarios contrefactuels définis pour la France et pour l'UE et simulés avec MATSIM-LUCA. La deuxième section est consacrée à la description détaillée des effets des différents scénarios français. La troisième section présente plus brièvement les résultats obtenus à l'issue des scénarios communautaires.

1. Définition des scénarios

1.1. Quelques données de références

Les chocs analysés portant sur la consommation de biocarburants en France et dans l'Europe, nous rappelons ici l'évolution des consommations de biodiesel et d'éthanol dans les différentes régions du monde entre 2004 et 2009.

Tableau 7 : Consommation observée de biodiesel (millions de tonnes)

	2004	2009	2009/04
UE	1,902	10,674	8,772
<i>Dont :</i>			
FR	0,324	2,31	1,986
<i>UE hors FR</i>	<i>1,578</i>	<i>8,364</i>	<i>6,786</i>
USA	0,124	1,043	0,919
CANADA	0	0,085	0,085
BRESIL	0	1,377	1,377
ARG	0	0,001	0,001
ASI_SE	0	0,206	0,206
ASI_SUD	0	0,01	0,01
CHINE	0,005	0,172	0,167
ASI_EST	0	0,12	0,12
THAI	0,002	0,535	0,533
AUS	0,006	0,106	0,1
EX_URSS		0,023	0,023
AUTRES	0,006	0,635	0,63
MONDE	2,045	14,987	12,942

Tableau 8 : Consommation observée d'éthanol (millions de tonnes)

	2004	2009	2009/2004
UE	0,73	3,52	2,80
<i>Dont :</i>			
FR	0,08	0,64	0,56
<i>UE hors FR</i>	<i>0,65</i>	<i>2,89</i>	<i>2,24</i>
USA	10,49	32,44	21,95
CANADA	0,17	1,15	0,98
BRESIL	9,66	17,24	7,58
ARG	0	0,02	0,02
ASI_SE	0	0,09	0,09
ASI_SUD	0,03	0,11	0,08
CHINE	0,79	1,62	0,83
AFR_SUB	0	0	0
ASI_EST	0	0,01	0,01
THAI	0	0,35	0,35
AUS	0,02	0,16	0,14
AUTRES	0,41	0,66	0,24
MONDE	22,3	57,36	35,06

Ainsi la consommation française de biodiesel a augmenté de 1,99 Mt entre 2004 et 2009, ce qui représente 15% de l'augmentation de la consommation mondiale de biodiesel (+12,42 Mt). A son tour, la consommation européenne de biodiesel a augmenté de 8,77 Mt, représentant 68% de l'augmentation de la consommation mondiale.

Les tonnages et pourcentages concernés sur le marché de l'éthanol sont moindres. En effet, la consommation française d'éthanol a augmenté de 560 000 tonnes entre 2004 et 2009, soit seulement 1,6% de l'augmentation de la consommation mondiale (+35,06 Mt) sur la période. L'augmentation de la consommation européenne, de 2,8 Mt, a représenté 8% de l'augmentation de la consommation mondiale.

1.2. Définition des scénarios analysés

Tous les scénarios sont bâtis sur le même principe. Partant de 2004, toutes les variables exogènes du modèle sont ajustées à leur niveau observé de 2009, sauf une que l'on maintient fixée à son niveau de 2004. Ainsi, en comparant les résultats de simulations aux données observées, il est possible d'isoler et de mesurer l'effet de la seule variable dont le niveau a été maintenu constant entre 2004 et 2009.

Dans les scénarios considérés, les variables exogènes alternativement maintenues à leur niveau de 2004 sont la consommation de biodiesel (en France puis dans l'UE), la consommation d'éthanol (en France puis dans l'UE) et la consommation totale de biocarburants (en France puis dans l'UE). Chaque scénario contrefactuel permet alors de « révéler » quelle aurait été la situation des marchés et en termes de changement d'affectation des sols en 2009 si la consommation française (ou européenne) de biodiesel, d'éthanol ou de biocarburants était restée à son niveau de 2004.

Limite d'interprétation des scénarios analysés :

Le développement des biocarburants en France sur la période considérée a été tiré par des objectifs annuels d'incorporation imposés aux distributeurs par le plan biocarburants. Dans le même temps, afin de permettre d'atteindre ces objectifs sur la base d'une production nationale, ont été mises en place des mesures incitatives à la production via la défiscalisation notamment. Ces mesures ont contribué à développer progressivement l'outil de production nécessaire.

Les scénarios analysés ici reviennent à considérer uniquement une stabilisation des objectifs d'incorporation imposés aux distributeurs au niveau atteint en 2004, les incitations à la production n'étant pas affectées. Ainsi, dans ces scénarios, l'outil productif continue à se développer entre 2004 et 2009 pour répondre à une augmentation de la demande externe à la France (scénarios français) ou à l'UE (scénarios communautaires).

Les scénarios introduisent donc un choc négatif sur la demande de biocarburants, française ou communautaire selon le scénario considéré. En revanche, la production domestique ne subit pas de choc direct et s'équilibre de manière endogène (à partir d'une situation de départ intégrant implicitement les incitations à la production) pour répondre à une demande extérieure qui évolue également de manière endogène.³

Les Tableaux 9 et 10 rapportent les chocs de demande appliqués dans chaque scénario pour la France (suffixe FR) et pour l'UE (suffixe UE) respectivement. Le scénario de référence, nommé REFFR ou REFUE, correspond à la situation observée en 2009.

³ Les scénarios considérés dans cette étude ont été choisis dans un souci de comparaison avec les études existantes, ces dernières retenant le plus souvent des chocs de consommation uniquement. Soulignons toutefois que les scénarios alternatifs qui considèrent à la fois un choc négatif sur la demande et une élimination des incitations à la production de biocarburants (en France ou dans l'UE) ont également été simulés. Les résultats en termes de changement d'affectation des sols au niveau mondial ne sont pas modifiés, seule leur localisation varie : la surface déplacée du fait du développement des biocarburants en France (ou dans l'UE) devient plus forte en France (ou dans l'UE) mais se réduit dans le reste du monde (par rapport aux scénarios sans élimination des incitations à la production). Une partie de la surface déplacée totale est relocalisée en France (ou dans l'UE) en raison de la baisse plus forte de la production française (ou communautaire) de biocarburants.

1.3. Taille des chocs

Tableau 9 : Définition des chocs simulés pour la France

	REFFR	ETHFR	BIODFR	CARBFR
Consommation d'éthanol (millions de tonnes)	0,636	Réduite à 0,08 (soit -0,556)	Constante à 0,636 (=)	Réduite à 0,08 (soit -0,556)
Consommation de biodiesel (millions de tonnes)	2,31	Constante à 2,31 (=)	Réduite à 0,324 (soit -1,986)	Réduite à 0,324 (soit -1,986)

La consommation française d'éthanol est passée de 80 000 tonnes en 2004 à 636 000 tonnes en 2009. Dans le même temps, la consommation française de biodiesel est passée de 324 000 tonnes à 2,31 millions de tonnes.

Le scénario de référence (REFFR) considère les quantités d'éthanol et de biodiesel effectivement consommées par la France en 2009. Le scénario ETHFR garde la consommation française de biodiesel à son niveau observé en 2009 et réduit la consommation française d'éthanol à son niveau observé en 2004 (80 000 tonnes), soit un choc imprimé de -556 000 tonnes (ou 1% de la consommation mondiale d'éthanol). Le scénario BIODFR garde la consommation française d'éthanol à son niveau observé de 2009 et réduit la consommation de biodiesel à son niveau observé en 2004 (324 000 tonnes) soit un choc imprimé de -1,986 million de tonnes (ou 13% de la consommation mondiale de biodiesel). Enfin le scénario CARBFR est la réunion des scénarios ETHFR et BIODFR.

Tableau 10 : Définition des chocs simulés pour l'Europe

	REFUE	ETHUE	BIODUE	CARBUE
Consommation d'éthanol (millions de tonnes)	3,52	Réduite à 0,73 (soit -2,79)	Constante à 3,52 (=)	Réduite à 0,73 (soit -2,79)
Consommation de biodiesel (millions de tonnes)	10,674	Constante à 10,674 (=)	Réduite à 1,902 (soit -8,77)	Réduite à 1,902 (soit -8,77)

Les scénarios pour l'UE sont construits de la même façon que les scénarios français. Le Tableau 10 indique que les chocs imprimés sont toutefois nettement supérieurs dans le cas de l'UE : ils représentent près de 5% et 59% de la consommation mondiale d'éthanol et de biodiesel respectivement.

2. Résultats de simulations des scénarios France

Nous analysons tout d'abord en détail les résultats du scénario BIODFR, c'est-à-dire les effets du choc biodiesel imprimé en France. Les résultats du choc éthanol imprimé en France (scénario ETHFR) sont ensuite décortiqués. Enfin les résultats du scénario CARBFR sont présentés.

A chaque fois, nous analysons d'abord les effets du scénario sur les prix mondiaux des biocarburants et des produits de grandes cultures. Puis nous examinons les impacts du scénario sur les bilans des marchés français de biocarburants et de produits de grandes cultures. Nous poursuivons par l'analyse des effets du scénario en termes de surfaces cultivées en France. Enfin nous terminons par l'analyse des effets du scénario sur les bilans de marchés et en termes de surfaces cultivées dans le reste du monde.

2.1. Résultats du scénario biodiesel France (BIODFR)

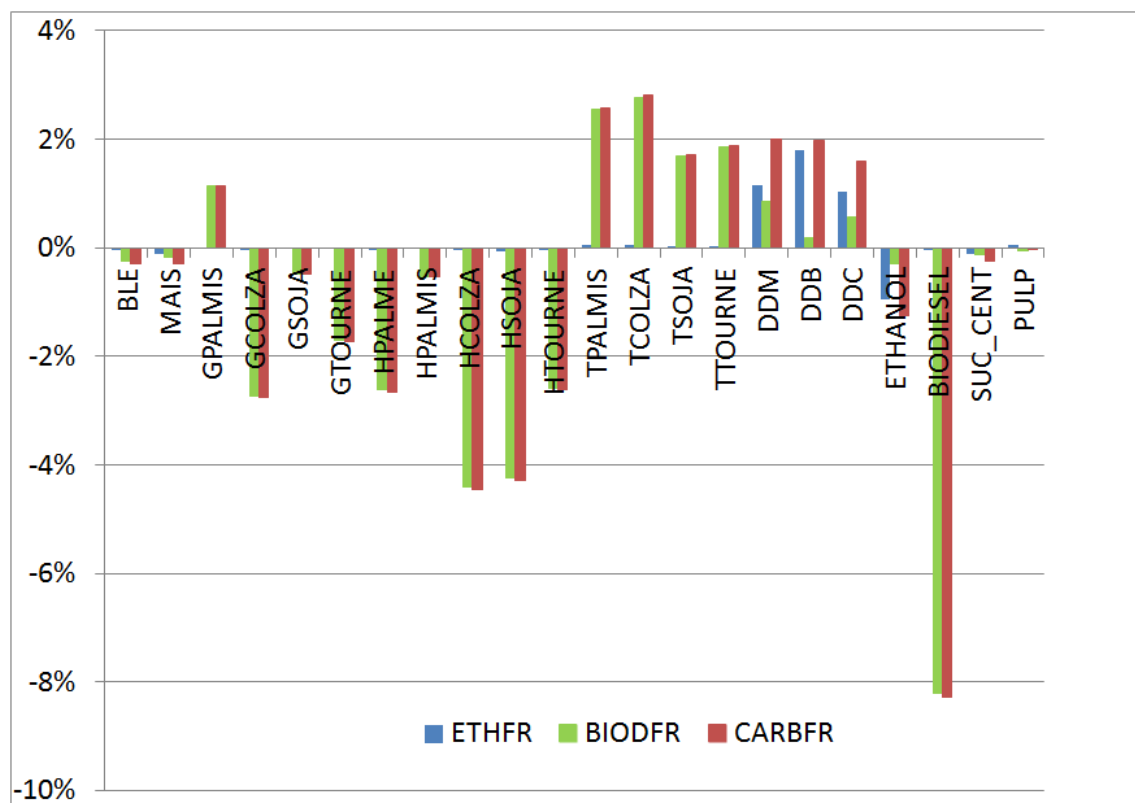
2.1.1 Impacts sur les prix mondiaux et sur les marchés français du biodiesel et des produits de grandes cultures

La Figure 24 ci-dessous reprend les résultats de simulations des trois scénarios définis pour la France : ETHFR, BIODFR et CARBFR, en termes de variation de prix, en % par rapport à la situation de référence 2009. Le graphique se lit de la manière suivante : si la consommation française de biodiesel était restée à son niveau observé de 2004 (scénario BIODFR, figuré par les barres vertes), le prix mondial du biodiesel aurait été inférieur de 8,2% à son niveau observé en 2009.

Synthèse de l'impact sur les prix mondiaux du scénario biodiesel France (BIODFR) :

De manière générale, la réduction de la consommation française de biodiesel appliquée par le scénario BIODFR conduit à contracter la demande de biodiesel sur l'ensemble des marchés. Ceci se traduit par une diminution du prix du biodiesel (-8,2% par rapport au niveau observé 2009), qui se transmet aux prix des huiles d'oléagineux (-4,4% pour l'huile de colza, -4,2% pour l'huile de soja, qui sont les deux huiles les plus touchées), puis aux prix des graines, dans des proportions diverses (-2,7% pour la graine de colza et -1,7% pour le tournesol, peu riches en tourteaux ; -0,5% seulement pour la graine de soja plus sensible au prix du tourteau). La contraction de la demande de biodiesel est suivie par une réduction de la production de biodiesel qui entraîne une réduction de la demande en huiles et un ajustement à la baisse de la production d'huiles. On observe donc une moindre production de tourteaux d'oléagineux. Les prix de ces derniers s'ajustent par conséquent à la hausse (+2,8% par rapport au niveau observé en 2009 pour le tourteau de colza et +1,7% pour le tourteau de soja). Enfin, les prix des céréales sont peu impactés par le scénario BIODFR, ce qui signifie qu'ils auraient été à peu près les mêmes en 2009, même sans développement de la consommation de biodiesel en France.

Figure 24 : Variations des prix mondiaux issues des 3 scénarios contrefactuels France (en % par rapport à la référence 2009)

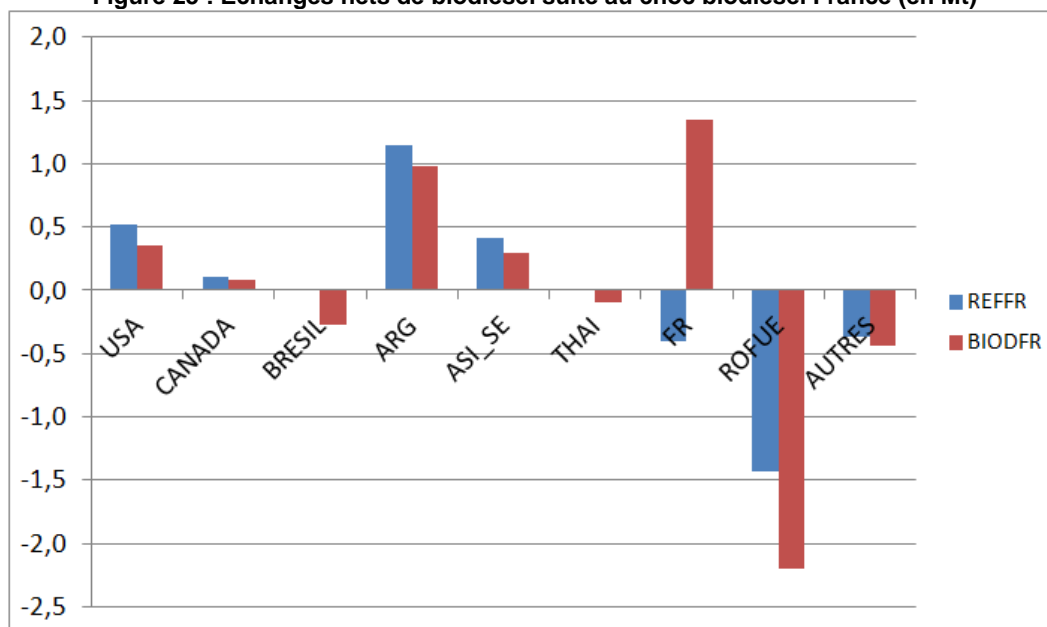


Source : Résultats de simulation

Le Tableau 11 indique que la réduction de 1,986 million de tonnes appliquée à la consommation française de biodiesel dans le scénario BIODFR se traduit par une baisse de -237 000 tonnes seulement de la production française de biodiesel. En d'autres termes, si la consommation française de biodiesel était restée à son niveau observé en 2004, la production française de biodiesel aurait été inférieure de 237 000 tonnes seulement à son niveau observé en 2009. La France aurait donc continué à produire pour répondre à la demande de biodiesel émanant des autres pays (cf. encadré p.26). Le Tableau 11 montre en effet que la consommation nationale diminuant plus que la production nationale, le scénario BIODFR entraîne un accroissement substantiel des exportations nettes françaises de biodiesel : +1,749 million de tonnes par rapport à la référence 2009. La Figure 25 révèle ainsi que la France, qui importait du biodiesel en 2009, aurait été exportatrice nette (à hauteur de 1,341 Mt) si sa consommation n'avait pas crû depuis 2004 ; le surcroît de ses exportations nettes auraient été absorbé principalement par le reste de l'UE et les autres pays exportateurs nets de biodiesel dans le monde (USA, Canada, Argentine, Asie du Sud-Est) en auraient exporté moins.

En France, la baisse de la production de biodiesel se traduit par une moindre utilisation d'huiles pour la fabrication de biocarburants de 244 000 tonnes, principalement supportée par le colza (-177 000 tonnes par rapport à la référence 2009). La production française d'huiles s'ajuste par conséquent à la baisse (-84 000 tonnes), entièrement supportée par le colza (-115 000 tonnes). La production française d'huiles diminuant moins que la demande nationale d'huiles pour la production de biocarburants, cela signifie que la France continue de produire de l'huile pour ses autres débouchés (demande nationale alimentaire, demande étrangère alimentaire et non alimentaire). Le Tableau 11 suggère que c'est essentiellement la demande étrangère qui tire la production française d'huiles, la consommation alimentaire domestique étant très peu impactée. Ainsi, à l'issue du scénario BIODFR, la France voit ses exportations nettes d'huiles augmenter de 157 000 tonnes, le pays réduisant ainsi son solde commercial déficitaire en huiles de -565 000 tonnes à -408 000 tonnes. Ce sont les exportations nettes d'huiles de tournesol et de colza qui augmentent principalement (+53 000 et +52 000 tonnes) mais on note également une diminution des importations nettes d'huile de soja, de l'ordre de 27 000 tonnes, et de palme, de l'ordre de 23 000 tonnes.

Figure 25 : Echanges nets de biodiesel suite au choc biodiesel France (en Mt)



Source : Résultats de simulation

Tableau 11 : Impacts du scénario BIODFR sur les marchés français du biodiesel et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009)

	MPbio	PROD	FOOD	FEED	TRIT	INDUS	BALANCE
ORGE	0,000	0,013	0,000	0,006	0,000	0,000	0,007
RIZ	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001
BLE	0,001	0,035	0,002	0,012	0,000	0,000	0,019
MAIS	0,000	0,025	0,000	0,004	0,000	0,000	0,021
CERDI	0,000	0,004	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000
POIS	0,000	0,005	0,000	0,007	0,000	0,000	-0,002
GCOLZA	0,000	-0,132	0,000	0,000	-0,260	0,000	0,128
GSOJA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	-0,009
GTOURNE	0,000	-0,021	0,000	0,000	0,064	0,000	-0,085
HPALME	-0,021	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,023
HPALMIS	0,000	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,000	0,002
HCOLZA	-0,177	-0,115	0,010	0,000	0,000	0,000	0,052
HSOJA	-0,028	0,002	0,003	0,000	0,000	0,000	0,027
HTOURNE	-0,018	0,029	-0,006	0,000	0,000	0,000	0,053
TCOLZA	0,000	-0,126	0,000	-0,052	0,000	0,000	-0,074
TSOJA	0,000	0,006	0,000	-0,004	0,000	0,000	0,010
TTOURNE	0,000	0,032	0,000	-0,004	0,000	0,000	0,036
DDB	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	-0,002
DDC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BIODIESEL	0,000	-0,237	0,000	0,000	0,000	-1,986	1,749
BET_SUC	-0,004	-0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
CAN_SUC	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
CEREALES	0,002	0,077	0,003	0,026	0,000	0,000	0,047
GRAINES	0,000	-0,154	0,000	0,000	-0,187	0,000	0,034
HUILES	-0,244	-0,084	0,003	0,000	0,000	0,000	0,157
TOURTEAUX	0,000	-0,087	0,000	-0,061	0,000	0,000	-0,026
COPRODUITS	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	-0,002
CULTURES SUCRIERES	-0,004	-0,003	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
BIOCARBURANTS	0,000	-0,237	0,000	0,000	0,000	-1,986	1,749

Source : Résultats de simulation

Enfin, si la consommation française de biodiesel était restée à son niveau observé en 2004, la production française de tourteaux aurait été inférieure de 87 000 tonnes par rapport à son niveau observé en 2009. C'est surtout la production de tourteaux de colza qui aurait été moindre, -126 000 tonnes, les productions de tourteaux de soja et de tournesol augmentant légèrement. Les tourteaux étant devenus plus onéreux, leur consommation en alimentation animale diminue de 61 000 tonnes au profit des céréales (+26 000 tonnes), du pois (+7 000 tonnes) et des coproduits céréaliers de la production d'éthanol (+2 000 tonnes), la substitution restant toutefois limitée. Au total, l'agrégat global

d'aliments concentrés pour les animaux diminue très légèrement en France, de -0,09% par rapport à la référence 2009.

Les variations de prix induites par le scénario BIODFR sont favorables aux céréales du côté de l'offre. Ainsi, en l'absence de développement de la consommation de biodiesel en France entre 2004 et 2009, la production céréalière française aurait été légèrement supérieure : +77 000 tonnes par rapport à la référence 2009 (principalement blé et maïs). Ce surcroît de production aurait été utilisé en interne en alimentation animale ou exporté vers l'extérieur.

2.1.2 Impacts en termes de changement d'affectation des sols en France

Le Tableau 12 ci-dessous indique que les ajustements sur les marchés, consécutifs au choc imprimé par le scénario BIODFR, conduisent à des changements d'affectation des sols très limités en France.

Synthèse des effets CAS en France du scénario biodiésel France (BIODFR) :

Si la consommation française de biodiesel était restée à son niveau de 2004, la surface cultivée en grandes cultures en France aurait été inférieure de 12 000 hectares à son niveau de référence 2009. Les surfaces en oléagineux auraient été réduites de 31 000 hectares (colza principalement, -25 000 ha) au profit des surfaces en céréales qui auraient augmenté de 18 000 hectares.

Il est à noter que seuls les 12 000 hectares supplémentaires de surfaces cultivées en grandes cultures en France qui peuvent être attribués au développement de la consommation française de biodiesel sont susceptibles de générer des émissions de gaz à effet de serre (GES), les reports entre cultures étant neutres à cet égard.

Tableau 12 : Impacts du scénario BIODFR sur les surfaces en grandes cultures en France (variations par rapport à la référence 2009)

	2009 (Mha)	(Mha)	(%)
ACEREALES	9,253	0,018	0,19%
AOLEAGINEUX	2,250	-0,031	-1,38%
ACULTSUC	0,415	0,000	0,11%
APOIS	0,114	0,001	0,80%
Total cultures	12,032	-0,012	-0,10%
AORGE	1,582	0,003	0,19%
ARIZ	0,024	0,000	0,05%
ABLE	5,426	0,010	0,18%
AMAI	1,572	0,004	0,24%
ACERDI	0,649	0,001	0,20%
AGCOLZA	1,481	-0,025	-1,67%
AGSOJA	0,044	0,000	0,04%
AGTOURNE	0,725	-0,006	-0,85%
ABET_SUC	0,143	0,000	0,09%
ABET_SUCQUOTA	0,231	0,000	0,12%
ACAN_SUC	0,041	0,000	0,16%

Source : Résultats de simulation

2.1.3 Impacts sur les marchés internationaux et en termes de changement d'affectation des sols au niveau mondial

Le Tableau 13 présente les bilans des marchés du biodiesel et des diverses grandes cultures au niveau mondial à l'issue de la simulation du scénario BIODFR.

Nous avons vu précédemment que la réduction de 1,986 million de tonnes de la consommation française de biodiesel conduisait à une réduction beaucoup plus faible de la production nationale (-237 000 tonnes par rapport à la référence 2009). Il y a donc en France un excès d'offre de biodiesel par rapport à la demande, qui entraîne une baisse du prix mondial. Celle-ci sert de signal de la nécessité d'une réduction de la production mondiale de biodiesel (hors France) pour rééquilibrer le marché. Cette réduction de la production s'observe dans toutes les zones productrices : la France donc (-237 000 tonnes), le reste de l'UE (-776 000 tonnes), le Brésil (-270 000 tonnes), les Etats-Unis (-167 000 tonnes), l'Argentine (-171 000 tonnes) et l'Asie du sud-est enfin (-120 000 tonnes).

La baisse de la production de biodiesel dans le monde conduit aux mêmes enchaînements d'effets que ceux décrits plus haut pour les marchés français : une diminution de la demande mondiale d'huiles végétales à des fins énergétiques (-2Mt environ par rapport à la référence 2009), compensée de manière très limitée par un accroissement de la demande alimentaire d'huiles végétales (+271 000 tonnes) et qui aboutit in fine, via l'ajustement des prix, à une réduction de la production d'huiles (-1,785 Mt).

Le Tableau 13 montre que la transmission du choc de demande de biodiesel aux demandes d'huiles, puis à la production d'huiles est variable d'une huile à l'autre et dépend beaucoup du contenu en huile et en tourteau des différentes graines. C'est la demande mondiale d'huile de colza à des fins énergétiques qui subit la plus grosse réduction (-852 000 tonnes), suivie de l'huile de soja (-677 000 tonnes) et de l'huile de palme (-399 000 tonnes). L'évolution de la demande alimentaire vient compenser celle de la demande à des fins énergétiques pour le colza et le soja (+329 000 tonnes et +558 000 tonnes respectivement). Elle accentue la baisse totale de la demande pour l'huile de palme (-309 000 tonnes), l'évolution comparée des prix rendant cette dernière moins compétitive au niveau de la demande alimentaire. Ainsi le choc de demande est transmis partiellement à la production pour le colza (-523 000 tonnes). Il ne l'est que très peu pour le soja (-119 000 tonnes), riche en tourteau et qui bénéficie de la bonne tenue des prix des tourteaux et, par suite, de la graine. Enfin, cette transmission est exacerbée dans le cas de la production d'huile de palme (et d'huile de tournesol) : -708 000 tonnes (-198 000 tonnes pour l'huile de tournesol) résultant du remplacement sur les marchés alimentaires de l'huile de palme par l'huile de colza et de soja, favorisées par la baisse plus importante de leurs prix.

Tableau 13 : Impacts du scénario BIODFR sur les marchés mondiaux du biodiesel et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009)

	MPbio	PROD	FOOD	FEED	TRIT	INDUS
ORGE	0,000	0,117	0,004	0,113	0,000	0,000
RIZ	0,000	0,224	0,224	0,000	0,000	0,000
BLE	0,058	0,238	0,028	0,152	0,000	0,000
MAIS	0,125	0,511	-0,056	0,442	0,000	0,000
CERDI	0,011	0,102	0,007	0,084	0,000	0,000
POIS	0,000	0,089	-0,002	0,092	0,000	0,000
GCOLZA	0,000	-1,218	0,000	0,000	-1,218	0,000
GSOJA	0,000	-0,620	0,007	0,000	-0,627	0,000
GTOURNE	0,000	-0,399	0,003	0,000	-0,401	0,000
HPALME	-0,399	-0,708	-0,309	0,000	0,000	0,000
HCOLZA	-0,852	-0,523	0,329	0,000	0,000	0,000
HSOJA	-0,677	-0,119	0,558	0,000	0,000	0,000
HTOURNE	-0,043	-0,198	-0,155	0,000	0,000	0,000
TCOLZA	0,000	-0,685	0,000	-0,685	0,000	0,000
TSOJA	0,000	-0,490	0,000	-0,490	0,000	0,000
TTOURNE	0,000	-0,068	0,000	-0,068	0,000	0,000
DDM	0,000	0,046	0,000	0,046	0,000	0,000
DDB	0,000	0,017	0,000	0,017	0,000	0,000
DDC	0,000	0,003	0,000	0,003	0,000	0,000
BIODIESEL	0,000	-1,986	0,000	0,000	0,000	-1,986
BET_SUC	-0,013	-0,069	0,000	0,000	0,000	-0,057
CAN_SUC	-0,891	-0,592	0,031	0,000	0,000	0,269
SUC_CENT	0,000	0,013	0,013	0,000	0,000	0,000
CEREALES	0,194	1,192	0,207	0,792	0,000	0,000
GRAINES	0,000	-2,816	0,028	0,000	-6,415	0,000
HUILES	-2,056	-1,785	0,271	0,000	0,000	0,000
TOURTEAUX	0,000	-1,495	-0,001	-1,494	0,000	0,000
COPRODUITS	0,000	0,067	0,000	0,067	0,000	0,000
CULTURES SUCRIERES	-0,904	-0,661	0,031	0,000	0,000	0,212

Source : Résultats de simulation

La réduction de la production mondiale d'huiles s'accompagne d'une moindre disponibilité de tourteaux pour l'alimentation animale (-1,495 Mt par rapport à la référence 2009). Ces derniers devenus plus onéreux sont très partiellement remplacés par des céréales (+792 000 tonnes), du pois

(+92 000 tonnes) et des coproduits de la production d'éthanol (+67 000 tonnes)⁴. Au niveau mondial, la réduction de la demande de biodiesel en France conduit à une diminution de l'utilisation d'aliments concentrés dans les rations animales (-0,05% par rapport à la situation de référence 2009).

Ces ajustements de marchés induisent des effets en termes de changement d'affectation des sols qui sont rapportés dans le Tableau 14.

Synthèse des effets CAS dans le monde du scénario biodiesel France (BIODFR) :

Si la consommation française de biodiesel était restée à son niveau observé en 2004, la surface totale en grandes cultures au niveau mondial aurait été inférieure de 443 000 hectares à son niveau observé en 2009.⁵ Cet impact global très faible, puisqu'il représente 0,05% des surfaces cultivées en grandes cultures en 2009 dans le monde, masque une réduction plus significative des surfaces en oléagineux (-1,1 million d'hectares), partiellement compensée par un accroissement de 612 000 hectares des surfaces en céréales, les surfaces en cultures sucrières et en pois étant peu impactées par le scénario BIODFR.

Là encore, on peut souligner que les 443 000 hectares supplémentaires de surfaces cultivées en grandes cultures dans le monde qui peuvent être attribués au développement de la consommation française de biodiesel sont susceptibles de générer des émissions de gaz à effet de serre (GES). Au niveau mondial, il convient d'être vigilant quant à la neutralité des reports entre cultures en termes de bilan des GES. Alors qu'en France ou en Europe, l'essentiel des reports entre cultures concerne des cultures annuelles il peut y avoir au niveau mondial des cultures pérennes qui laissent la place à des cultures annuelles ou, inversement, des cultures pérennes qui prennent la place de cultures annuelles. Dans le premier cas il peut y avoir émission de gaz à effet de serre, mais dans le second cas du carbone peut être stocké durablement et il y a donc captation de gaz à effet de serre.

Le Tableau 14 indique que c'est essentiellement la graine de colza qui perd des surfaces (-1,26% soit -393 000 hectares) suivie par le tournesol (-199 000 hectares) et le palme (-163 000 hectares). On peut noter que malgré la réduction plus importante de la production mondiale d'huile de palme, par rapport aux autres huiles, l'impact en termes de surfaces cultivées reste inférieur, du fait d'un meilleur rendement en huile des palmiers.

⁴ La nouvelle hiérarchie des prix issue du scénario BIODFR rend la production d'éthanol à partir de céréales plus intéressante que la production d'éthanol à partir de cultures sucrières. Le choc de biodiesel conduit donc à une légère augmentation de la production de coproduits céréaliers de la fabrication d'éthanol.

⁵ Ce chiffre intègre les -12 000 hectares pour la France évoqués précédemment.

Tableau 14 : Impacts du scénario BIODFR sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations par rapport à la référence 2009)

	2009(Mha)	(Mha)	(%)
ACEREALES	693,914	0,612	0,09%
AOLEAGINEUX	231,599	-1,099	-0,47%
ACULTSUC	28,093	0,004	0,01%
APOIS	6,216	0,040	0,64%
Total cultures	959,822	-0,443	-0,05%
AORGE	55,668	0,058	0,10%
ARIZ	156,020	0,108	0,07%
ABLE	227,166	0,173	0,08%
AMAIS	157,763	0,194	0,12%
ACERDI	97,297	0,079	0,08%
AGCOPRAH	11,552	-0,124	-1,07%
AGCOTON	29,424	-0,011	-0,04%
AGPALME	14,886	-0,163	-1,10%
AGARACHI	20,395	-0,093	-0,46%
AGCOLZA	31,092	-0,393	-1,26%
AGSOJA	102,170	-0,115	-0,11%
AGTOURNE	22,080	-0,199	-0,90%
ABET_SUC	3,303	0,001	0,02%
ACAN_SUC	23,819	0,002	0,01%

Source : Résultats de simulation

Le

Tableau 15 détaille l'impact du scénario BIODFR en termes de surfaces cultivées par pays et régions considérés dans notre modèle. Comme déjà indiqué, la réponse de la surface française en grandes cultures est très faible. Elle ne contribue qu'à hauteur de 2,7% de l'ajustement mondial total de surfaces. Le plus fort ajustement s'opère en Afrique sub-saharienne, soit -64 000 ha par rapport à la situation observée et 14% de l'ajustement des surfaces dans le monde. L'ex-URSS, la Chine et le Brésil sont les autres zones les plus affectées, à hauteur de respectivement -61 000 ha (14% de l'ajustement mondial), -58 000 ha (13%), et -52 000 ha (12%). Rappelons ici que les surfaces déplacées sont très faibles par rapport aux surfaces observées dans chaque zone en 2009 (de 0,01 à 0,10 %, le plus fort ajustement en termes relatifs étant constaté au Canada, au Brésil et en France).

Tableau 15 : Impacts du scénario BIODFR sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)

Zone	ACEREALES	ACULTSUC	AOLEAGINEUX	APOIS	Total général
AFR_NOR	-0,002	0,000	-0,003	0,000	-0,004
AFR_SUB	0,074	0,001	-0,141	0,003	-0,064
ARG	0,009	0,000	-0,030	0,000	-0,020
ASI_EST	-0,002	0,000	0,000	0,000	-0,002
ASI_SE	0,148	0,003	-0,156	0,000	-0,005
ASI_SUD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AUS	0,008	0,000	-0,026	0,002	-0,017
AUTRES	0,018	0,002	-0,065	0,001	-0,044
BRESIL	0,000	-0,005	-0,047	0,000	-0,052
CANADA	0,051	0,000	-0,089	0,013	-0,025
CHINE	0,091	0,001	-0,156	0,006	-0,058
EX_URSS	0,083	0,000	-0,152	0,008	-0,061
FR	0,018	0,000	-0,031	0,001	-0,012
MEX	0,001	0,000	-0,004	0,000	-0,004
UE hors FR	0,079	0,001	-0,117	0,003	-0,035
THAI	0,005	0,001	-0,012		-0,006
USA	0,033	0,000	-0,070	0,002	-0,035
Total général	0,612	0,004	-1,099	0,040	-0,443

Source : Résultats de simulation

2.2. Résultats du scénario éthanol France (ETHFR)

Pour mémoire, le scénario ETHFR revient à réduire la demande française d'éthanol enregistrée en 2009 de 556 000 tonnes pour la ramener à son niveau observé de 2004.

2.2.1 Impacts sur les prix mondiaux et sur les marchés français de l'éthanol et des produits de grandes cultures

Synthèse de l'impact sur les prix mondiaux du scénario éthanol France (ETHFR) :

La Figure 24 indique que si la consommation française d'éthanol était restée à son niveau observé en 2004, le prix mondial de l'éthanol aurait été inférieur de 0,9% à son niveau observé en 2009. L'impact du scénario ETHFR sur le prix mondial de l'éthanol est par conséquent très inférieur à l'impact du scénario BIODFR sur le prix mondial du biodiesel (-8,3%). Ceci est dû à la faible ampleur du choc appliqué dans ETHFR (-556 000 tonnes pour une consommation mondiale d'éthanol de 57,36 millions de tonnes observée en 2009) relativement à celle du choc appliqué dans BIODFR (-1,986 million de tonnes pour une consommation mondiale de biodiesel de près de 15 millions de tonnes observée en 2009).

La contraction de la demande d'éthanol, appliquée dans le scénario ETHFR, induit donc une diminution du prix de l'éthanol qui se diffuse au prix mondial du sucre (-0,12% par rapport à la référence 2009). En effet, la diminution du prix de l'éthanol rend l'activité de production de sucre plus rentable en termes relatifs. La production mondiale de sucre augmente par conséquent (au Brésil) et son prix s'ajuste à la baisse. La diminution du prix de l'éthanol se transmet très peu aux prix des céréales (qui diminuent en moyenne de 0,05% par rapport à la référence) : ces derniers diminuent en effet moins dans le scénario ETHFR que dans le scénario BIODFR.

La contraction de la demande d'éthanol est suivie par une réduction de la production d'éthanol qui entraîne une moindre production de coproduits de la production d'éthanol à partir de céréales et une moindre production de pulpe de betteraves. Ces différents coproduits voient donc leurs prix augmenter dans le scénario ETHFR : de +1 % à +1,8% selon les drêches et de +0,05% pour la pulpe, par rapport à la référence 2009.

Enfin les prix des produits oléagineux sont très peu impactés par le scénario ETHFR.

Tableau 16 : Impacts du scénario ETHFR sur les marchés français de l'éthanol et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009)

	MPbio	PROD	FOOD	FEED	TRIT	INDUS	BALANCE
ORGE	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001
BLE	0,000	-0,005	0,000	0,001	0,000	0,000	-0,006
MAIS	-0,002	-0,012	0,001	0,004	0,000	0,000	-0,014
DDM	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000
DDB	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,000	0,000	0,003
DDC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ETHANOL	0,000	-0,003	0,000	0,000	0,000	-0,556	0,553
BET_SUC	-0,023	-0,026	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,000
CAN_SUC	0,000	-0,003	0,000	0,000	0,000	-0,003	0,000
SUC_CENT	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001
PULP	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000
CEREALES	-0,002	-0,018	0,001	0,005	0,000	0,000	-0,022
GRAINES	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,001
HUILES	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001
TOURTEAUX	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	-0,001
COPRODUITS	0,000	-0,002	0,000	-0,005	0,000	0,000	0,003
CULTURES SUCRIERES	-0,023	-0,029	0,000	0,000	0,000	-0,006	0,000

Source : Résultats de simulation

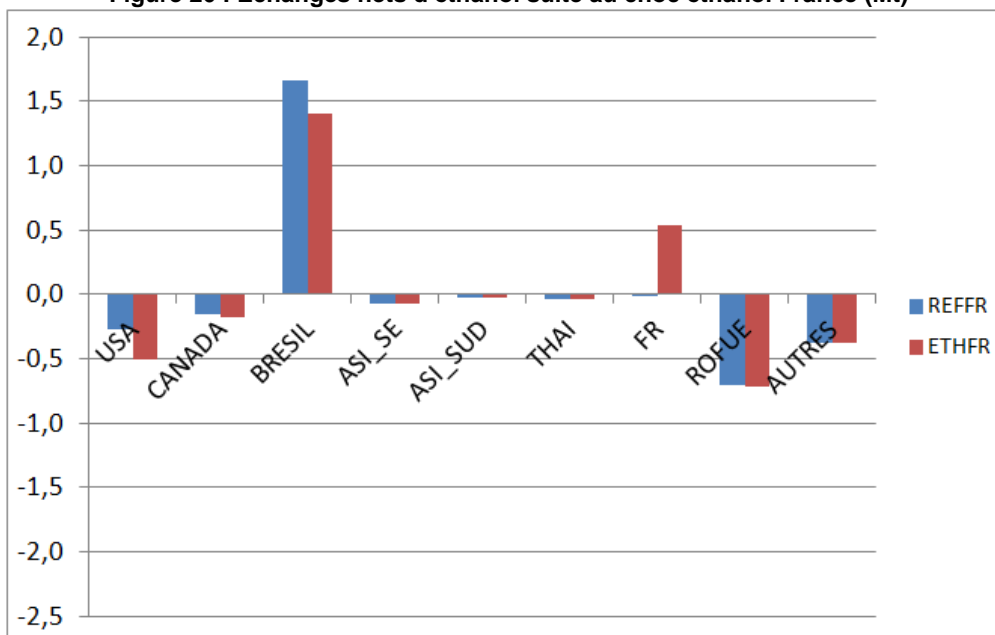
Le Tableau 16 indique qu'à la suite de la réduction de 556 000 tonnes appliquée à la demande française d'éthanol, la production française ne se réduit que de 3 000 tonnes. Le choc du côté de la demande est par conséquent très peu transmis à la production nationale. Si la consommation française d'éthanol était restée à son niveau observé en 2004, la France aurait tout de même continué à produire de l'éthanol pour les marchés extérieurs (cf. encadré p. 26). Ainsi, on voit au Tableau 16 que le scénario ETHFR conduit à un accroissement des exportations nettes françaises de 553 000 tonnes (soit la quasi-totalité de la quantité d'éthanol qui n'est plus consommée en France). La Figure 26 indique ainsi que la France passe d'une situation de faible importatrice nette d'éthanol à une situation d'exportatrice nette, prenant des parts de marché sur les autres pays producteurs d'éthanol, essentiellement le Brésil dont les exportations nettes diminuent d'environ 260 000 tonnes par rapport à la référence 2009.

En France, suite à la diminution de la production d'éthanol, la consommation de betteraves et de céréales (maïs) à des fins énergétiques baisse également (-23 000 tonnes et -2 000 tonnes respectivement). Les productions françaises de betteraves et de céréales s'ajustent par conséquent à la baisse (-26 000 tonnes et -18 000 tonnes respectivement). Cette baisse de production plus importante que celle de la demande énergétique provient d'une part de la baisse induite du prix du sucre qui a pour effet une réduction de la demande de betterave par les sucreries et, d'autre part, par la détérioration de la balance commerciale céréalière française.

Enfin, si la consommation française d'éthanol était restée à son niveau observée en 2004, la production de drêches de céréales aurait été inférieure de 1 000 tonnes par rapport à son niveau observé en 2009 et celle de pulpe également de 1 000 tonnes. Ces ingrédients, devenus plus onéreux, auraient été moins utilisés en alimentation animale (-4 000 et -1 000 tonnes respectivement)

où ils auraient été remplacés par des céréales essentiellement (+5 000 tonnes) et des tourteaux (+1 000 tonnes), ces ajustements de la ration se révélant neutres au regard de la quantité totale consommée d'aliments composés.

Figure 26 : Echanges nets d'éthanol suite au choc éthanol France (Mt)



Source : Résultats de simulation

2.2.2 Impacts en termes de changement d'affectation des sols en France

Le Tableau 19 ci-après indique que les ajustements sur les marchés consécutifs au choc imprimé par le scénario ETHFR impactent à peine les surfaces cultivées en grandes cultures en France. Ainsi, si la consommation française d'éthanol était restée à son niveau observée en 2004, la surface cultivée en grandes cultures en France aurait été inférieure de 1000 hectares par rapport à son niveau de référence 2009. Cette réduction de surface aurait touché le maïs essentiellement.

Nous verrons par la suite que c'est principalement à l'étranger que le scénario ETHFR produit des effets en termes de changement d'affectation des sols.

2.2.3 Impacts sur les marchés internationaux et en termes de changement d'affectation des sols au niveau mondial

Le Tableau 17 présente les bilans des marchés de l'éthanol et des diverses grandes cultures au niveau mondial à l'issue de la simulation du scénario ETHFR. Il indique que les ajustements opérés au niveau mondial sont de bien plus grande ampleur que ceux imprimés aux marchés français.

Nous avons vu précédemment que la réduction de 556 000 tonnes de la consommation française d'éthanol se traduisait par une baisse de la production française d'éthanol de 3 000 tonnes seulement. Un ajustement supplémentaire à la baisse de la production mondiale d'éthanol (hors France) est donc nécessaire pour rééquilibrer le marché. Cette réduction de la production, suite à la baisse du prix mondial de l'éthanol, s'observe essentiellement au Brésil (-260 000 tonnes environ d'éthanol de canne) et aux Etats-Unis (-240 000 tonnes environ d'éthanol de maïs). Il en résulte que la réduction imprimée en France sur la consommation d'éthanol se traduit essentiellement par une réduction de la consommation à des fins énergétiques de canne à sucre (de l'ordre de 4 millions de tonnes) et de maïs (816 000 tonnes). L'utilisation à des fins énergétiques de betteraves et d'autres céréales diminue également mais dans une moindre mesure (67 000 tonnes pour la betterave, 84 000 tonnes pour le blé et 11 000 tonnes pour les céréales diverses).

**Tableau 17 : Impacts du scénario ETHFR sur les marchés mondiaux de l'éthanol et des grandes cultures
(en Mt par rapport à la référence 2009)**

	MPbio	PROD	FOOD	FEED	TRIT	INDUS
ORGE	0,000	-0,008	-0,002	-0,007	0,000	0,000
RIZ	0,000	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000
BLE	-0,084	-0,075	0,006	0,002	0,000	0,000
MAIS	-0,816	-0,551	0,060	0,205	0,000	0,000
CERDI	-0,011	-0,010	0,000	0,001	0,000	0,000
POIS	0,000	0,003	0,000	0,003	0,000	0,000
GCOLZA	0,000	-0,002	0,000	0,000	-0,002	0,000
GSOJA	0,000	0,078	0,000	0,000	0,078	0,000
GTOURNE	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,002	0,000
HPALME	-0,002	-0,008	-0,006	0,000	0,000	0,000
HCOLZA	-0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
HSOJA	0,002	0,014	0,012	0,000	0,000	0,000
HTOURNE	0,000	-0,001	-0,001	0,000	0,000	0,000
TCOLZA	0,000	-0,001	0,000	-0,001	0,000	0,000
TSOJA	0,000	0,062	0,000	0,062	0,000	0,000
TTOURNE	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
DDM	0,000	-0,302	0,000	-0,302	0,000	0,000
DDB	0,000	-0,025	0,000	-0,025	0,000	0,000
DDC	0,000	-0,003	0,000	-0,003	0,000	0,000
ETHANOL	0,000	-0,556	0,000	0,000	0,000	-0,556
BET_SUC	-0,067	-0,164	0,000	0,000	0,000	-0,097
CAN_SUC	-4,104	-3,653	0,035	0,000	0,000	0,416
SUC_CENT	0,000	0,013	0,013	0,000	0,000	0,000
PULP	0,000	-0,008	0,000	-0,008	0,000	0,000
CEREALES	-0,910	-0,638	0,071	0,201	0,000	0,000
GRAINES	0,000	0,078	0,001	0,000	0,039	0,000
HUILES	0,000	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000
TOURTEAUX	0,000	0,063	0,000	0,063	0,000	0,000
COPRODUITS	0,000	-0,330	0,000	-0,330	0,000	0,000
CULTURES SUCRIERES	-4,171	-3,817	0,035	0,000	0,000	0,319

Source : Résultats de simulation

La production mondiale de ces matières premières s'ajuste plus ou moins à la baisse selon les cultures considérées. Dans le cas de la canne à sucre, la baisse de la demande à des fins énergétiques est partiellement compensée par une augmentation de la demande pour la production de sucre (+416 000 tonnes). Le prix mondial du sucre diminuant en effet moins en termes relatifs que

le prix mondial de l'éthanol, la production de sucre de canne devient plus rentable et s'accroît. Il en résulte que la production mondiale de canne à sucre n'est réduite « que » de 3,653 millions de tonnes. La betterave en revanche ne profite pas de ce report entre production d'éthanol et production de sucre : le différentiel de baisse de prix entre éthanol et sucre n'est pas suffisant pour que la production de sucre de betterave devienne plus rentable. Ainsi, la demande de betteraves est-elle doublement impactée par la baisse du prix de l'éthanol et du prix du sucre. Au total la production mondiale de betterave à sucre est réduite de 164 000 tonnes. Enfin, dans le cas des céréales, la baisse de la demande à des fins énergétiques (-910 000 tonnes) est partiellement compensée par un accroissement de la demande animale (+201 000 tonnes, bénéficiant quasi-exclusivement au maïs dont le prix diminue plus fortement que celui des autres céréales). La production mondiale de céréales s'ajuste finalement à la baisse de 638 000 tonnes par rapport à la référence 2009.

La réduction de la production mondiale d'éthanol s'accompagne d'une diminution de la disponibilité de coproduits issus de l'éthanol de céréales (-330 000 tonnes par rapport à la référence 2009) et de pulpes issus de l'éthanol et du sucre de betteraves (-8 000 tonnes). Ces tonnages sont remplacés par les céréales (maïs surtout) dans la ration animale et dans une moindre mesure également par des tourteaux. Au total, l'agrégat d'aliments concentrés reste stable, en se contractant de seulement 0,01% au total dans le monde. Ces ajustements de marchés induisent des effets en termes de changement d'affectation des sols qui sont rapportés dans le Tableau 18.

Tableau 18 : Impacts du scénario ETHFR sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations par rapport à la référence 2009)

	2009 (Mha)	(Mha)	(%)
ACEREALES	693,914	-0,070	-0,01%
AOLEAGINEUX	231,599	0,030	0,01%
ACULTSUC	28,093	-0,038	-0,14%
APOIS	6,216	0,002	0,03%
Total cultures	959,822	-0,077	-0,01%
AORGE	55,668	0,001	0,00%
ARIZ	156,020	0,005	0,00%
ABLE	227,166	-0,008	0,00%
AMAI	157,763	-0,068	-0,04%
ACERDI	97,297	0,000	0,00%
AGCOPRAH	11,552	0,000	0,00%
AGCOTON	29,424	0,004	0,01%
AGPALME	14,886	0,000	0,00%
AGARACHI	20,395	0,001	0,00%
AGCOLZA	31,092	0,001	0,00%
AGSOJA	102,170	0,024	0,02%
AGTOURNE	22,080	0,001	0,00%
ABET_SUC	3,303	-0,002	-0,07%
ACAN_SUC	23,819	-0,036	-0,15%

Source : Résultats de simulation

Synthèse des effets CAS dans le monde du scénario éthanol France (ETHFR) :

Si la consommation française d'éthanol était restée à son niveau observé en 2004, la surface totale en grandes cultures au niveau mondial aurait été inférieure de 77 000 hectares à son niveau observé en 2009. Cet impact global est très faible puisqu'il représente 0,01% des surfaces cultivées en grandes cultures en 2009 dans le monde. Si l'on raisonne en niveau, la plus grande part de la réduction des surfaces cultivées est supportée par les céréales (-70 000 hectares, essentiellement maïs), suivies par les cultures sucrières (-38 000 hectares, essentiellement canne à sucre). Si l'on s'intéresse aux variations relatives toutefois, ce sont les surfaces en cultures sucrières qui sont les plus touchées (-0,14%). Les surfaces cultivées en oléagineux et en pois augmentent quant à elles légèrement à l'issue du scénario ETHFR.

Le Tableau 19 détaille l'impact du scénario ETHFR en termes de surfaces cultivées par pays et zones considérés dans le modèle. Comme déjà indiqué, la réponse de la surface française en grandes cultures est quasi-inexistante. L'ajustement le plus fort s'opère au Brésil (-22 000 hectare par rapport à la référence 2009, essentiellement cultures sucrières) et en Afrique sub-saharienne (-13 000 hectares, essentiellement céréales). Le scénario ETHFR déplace également -9 000 hectares aux Etats-Unis, -7 000 hectares en ex-URSS et -6 000 hectares en Chine, de céréales essentiellement.

Tableau 19 : Impacts du scénario ETHFR sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)

Zone	ACEREALES	ACULTSUC	AOLEAGINEUX	APOIS	Total général
AFR_NOR	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001
AFR_SUB	-0,014	-0,001	0,001	0,000	-0,013
ARG	-0,003	0,000	0,002	0,000	-0,001
ASI_EST	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ASI_SE	-0,001	-0,001	0,000	0,000	-0,002
ASI_SUD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AUS	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001
AUTRES	-0,004	-0,002	0,002	0,000	-0,005
BRESIL	-0,003	-0,029	0,010	0,000	-0,022
CANADA	-0,002	0,000	0,000	0,000	-0,001
CHINE	-0,011	-0,001	0,005	0,000	-0,006
EX_URSS	-0,008	-0,001	0,001	0,000	-0,007
FR	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001
MEX	-0,001	0,000	0,000	0,000	-0,001
UE hors FR	-0,004	-0,001	0,000	0,000	-0,004
THAI	0,000	-0,001	0,000	0,000	-0,001
USA	-0,017	-0,001	0,008	0,000	-0,009
Total général	-0,070	-0,038	0,030	0,002	-0,077

Source : Résultats de simulation

2.3. Résultats du scénario biocarburants France (CARBFR)

Le scénario CARBFR combine les scénarios BIODFR et ETHFR. Les résultats de simulation de CARBFR indiquent que les effets de ce scénario sur les prix et les marchés correspondent à peu près à la somme des effets des scénarios BIODFR et ETHFR, décrits précédemment. Nous ne reprenons donc ci-dessous que les impacts du scénario CARBFR sur les surfaces cultivées en grandes cultures, en France, au niveau mondial et par pays et régions du modèle.

Synthèse des CAS dans le monde du scénario biocarburants France (CARBFR) :

Le Tableau 20 ci-dessus indique que, si la consommation française de biocarburants était restée à son niveau observé en 2004, les surfaces cultivées en oléagineux auraient été inférieures de 31 000 ha par rapport à leur niveau observé en 2009. Au contraire, les surfaces en céréales auraient été supérieures de 17 000 ha. Au total, les surfaces françaises en grandes cultures auraient été amputées de 13 000 ha par rapport à leur niveau observé en 2009. En d'autres termes, le développement de la consommation des biocarburants en France entre 2004 et 2009 a eu un impact très limité sur les surfaces cultivées à l'intérieur du pays.

Le Tableau 21 suggère que l'impact du développement des biocarburants en France entre 2004 et 2009 aurait également eu un impact limité sur les surfaces cultivées au niveau mondial. Ainsi, si la consommation française de biocarburants était restée à son niveau de 2004, les surfaces cultivées en grandes cultures dans le monde auraient été inférieures de 517 000 ha par rapport à leur niveau observé en 2009 (soit 0,05% de la superficie totale mondiale en grandes cultures). Cette diminution aurait concerné les surfaces en oléagineux (-1,063 million d'hectares) et les surfaces en cultures sucrières (-34 000 ha). En revanche, les surfaces en céréales et en pois auraient augmenté de 539 000 et 41 000 hectares respectivement.

Tableau 20 : Impacts du scénario CARBFR sur les surfaces en grandes cultures en France (variations en Mha par rapport à la référence 2009)

	2009 (Mha)	(Mha)	(%)
ACEREALES	9,253	0,017	0,18%
AOLEAGINEUX	2,250	-0,031	-1,36%
ACULTSUC	0,415	0,000	0,06%
APOIS	0,114	0,001	0,83%
Total cultures	12,032	-0,013	-0,10%
AORGE	1,582	0,003	0,19%
ARIZ	0,024	0,000	0,05%
ABLE	5,426	0,010	0,18%
AMAI	1,572	0,003	0,18%
ACERDI	0,649	0,001	0,19%
AGCOLZA	1,481	-0,024	-1,65%
AGSOJA	0,044	0,000	0,06%
AGTOURNE	0,725	-0,006	-0,84%
ABET_SUC	0,143	0,000	-0,05%
ABET_SUCQUOTA	0,231	0,000	0,13%
ACAN_SUC	0,041	0,000	0,09%

Source : Résultats de simulation

Tableau 21 : Impacts du scénario CARBFR sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations en Mha par rapport à la référence 2009)

	2009 (Mha)	(Mha)	(%)
ACEREALES	693,914	0,539	0,08%
AOLEAGINEUX	231,599	-1,063	-0,46%
ACULTSUC	28,093	-0,034	-0,12%
APOIS	6,216	0,041	0,67%
Total cultures	959,822	-0,517	-0,05%
AORGE	55,668	0,059	0,11%
ARIZ	156,020	0,113	0,07%
ABLE	227,166	0,164	0,07%
AMAI	157,763	0,125	0,08%
ACERDI	97,297	0,078	0,08%
AGCOPRAH	11,552	-0,123	-1,07%
AGCOTON	29,424	-0,007	-0,02%
AGPALME	14,886	-0,165	-1,11%
AGARACHI	20,395	-0,092	-0,45%
AGCOLZA	31,092	-0,388	-1,25%
AGSOJA	102,170	-0,089	-0,09%
AGTOURNE	22,080	-0,198	-0,90%
ABET_SUC	3,303	-0,002	-0,05%
ACAN_SUC	23,819	-0,034	-0,14%

Source : Résultats de simulation

Tableau 22 : Impacts du scénario CARBFR sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)

Zone	ACEREALES	ACULTSUC	AOLEAGINEUX	APOIS	Total général
AFR_NOR	-0,003	0,000	-0,002	0,000	-0,005
AFR_SUB	0,060	0,000	-0,139	0,003	-0,076
ARG	0,006	0,000	-0,028	0,000	-0,021
ASI_EST	-0,002	0,000	0,000	0,000	-0,002
ASI_SE	0,147	0,003	-0,156	0,000	-0,007
ASI_SUD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AUS	0,006	0,000	-0,026	0,002	-0,018
AUTRES	0,014	-0,001	-0,063	0,001	-0,049
BRESIL	-0,003	-0,034	-0,036	0,000	-0,074
CANADA	0,049	0,000	-0,088	0,013	-0,026
CHINE	0,079	0,000	-0,149	0,006	-0,064
EX_URSS	0,075	0,000	-0,151	0,009	-0,068
FR	0,017	0,000	-0,031	0,001	-0,013
MEX	0,000	0,000	-0,004	0,000	-0,005
UE hors FR	0,074	0,000	-0,116	0,003	-0,038
THAI	0,005	0,000	-0,012		-0,006
USA	0,016	0,000	-0,062	0,002	-0,044
Total général	0,539	-0,034	-1,063	0,041	-0,517

Source : Résultats de simulation

Tous les pays et zones du modèle sont concernés par cet ajustement à la baisse des surfaces cultivées en grandes cultures. Si l'on raisonne en niveau, c'est en Afrique sub-saharienne (-76 000 ha), au Brésil (-74 000 ha), en ex-URSS (-68 000 ha) et en Chine (-64 000 ha) que les réductions de surfaces sont les plus fortes (cf. Tableau 22).

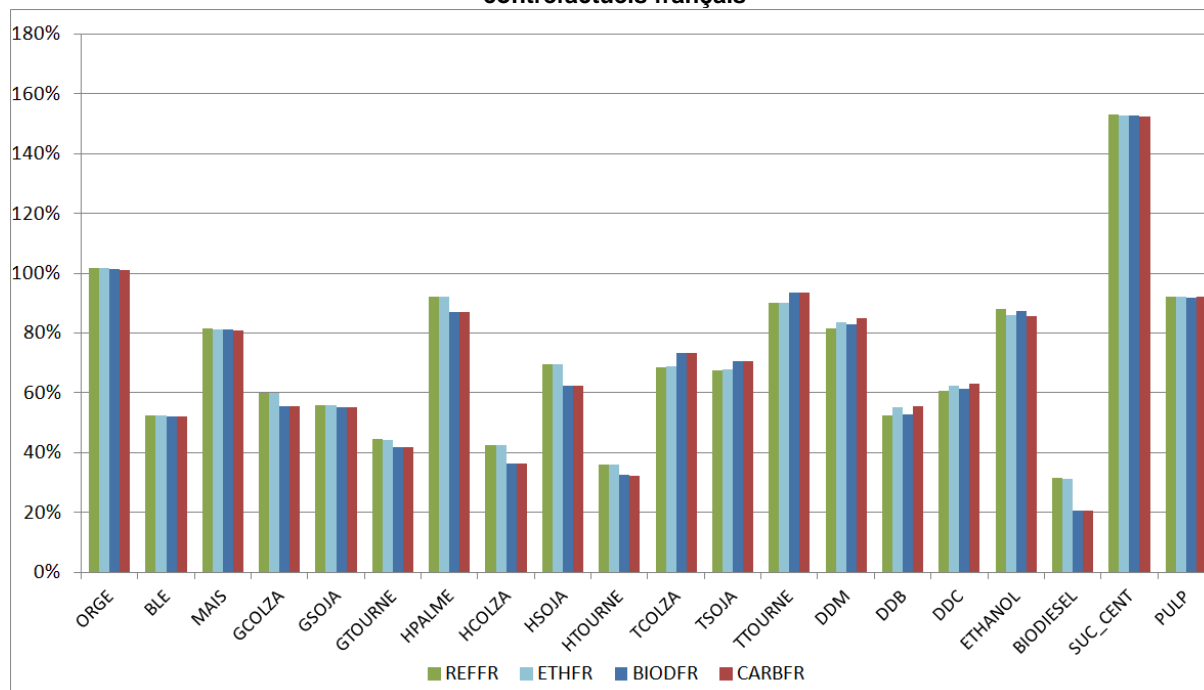
2.4. Synthèse des résultats de simulation des 3 scénarios contrefactuels français : BIODFR, ETHFR et CARBFR

Nous résumons dans ce paragraphe les impacts en termes de prix et de surfaces cultivées des 3 scénarios français. Nous adoptons en outre une présentation différente : dans ce qui suit, nous raisonnons sur les évolutions des prix et des surfaces cultivées entre 2004 et 2009 et nous mettons en évidence la contribution du développement de la consommation française de biodiesel, d'éthanol ou du total biocarburants à ces évolutions. Dans toutes les figures présentées dans ce paragraphe, la barre la plus à gauche représente la variation de la variable considérée réellement observée entre 2004 et 2009 (scénario REFFR).

2.4.1 Impacts sur les prix mondiaux

La Figure 27 rapporte les variations en pourcentage des prix mondiaux des différents produits observées entre 2004 et 2009 (REFFR) et obtenues à l'issue des trois scénarios contrefactuels (ETHFR, BIODFR et CARBFR).

Figure 27 : Variations des prix mondiaux entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels français



Source : Résultats de simulations

Prenons le prix mondial de l'huile de colza à titre d'exemple. Ce prix est passé de 650 USD/t en 2004 à 927 USD/t en 2009 (prix année campagne 2009/2010), soit une augmentation de 43% dans le scénario REFFR. Lorsque la consommation française de biocarburants est maintenue à son niveau de 2004 (CARBFR), le prix mondial de l'huile de colza passe de 650 USD/t en 2004 à 886 USD/t en 2009 : soit une augmentation de « seulement » 36%. On peut donc conclure que le développement de la consommation française de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait contribué à tirer à la hausse le prix mondial de l'huile de colza à hauteur de 7 points de pourcentage, le reste de l'augmentation observé s'expliquant alors par d'autres facteurs conjoncturels et structurels en France et dans le monde (évolution des structures et niveaux de demande et de production liés aux évolutions de la population, des revenus, aux aléas climatiques, aux changements de politiques, ...).

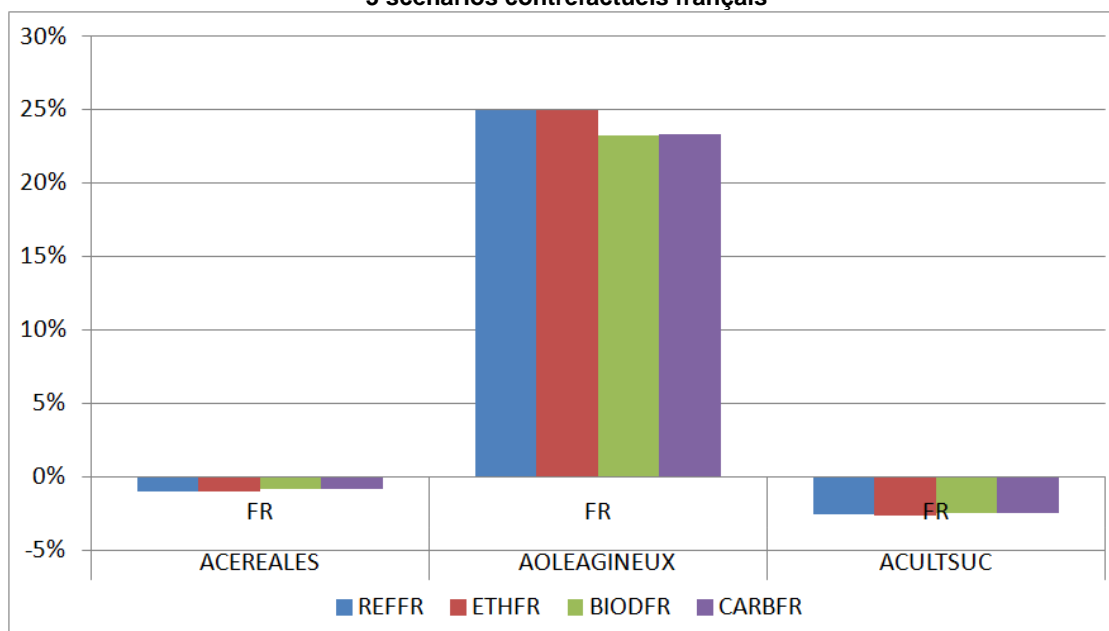
L'analyse s'effectue de la même manière pour les prix de tous les produits. Ainsi, la Figure 27 suggère que le développement de la consommation de biocarburants en France entre 2004 et 2009 aurait contribué surtout à accroître le prix du biodiesel (à hauteur de 11 points de pourcentage), les prix des huiles oléagineuses (6 points de pourcentage pour l'huile de colza, 7 pour l'huile de soja, 5 pour l'huile de palme et 4 pour l'huile de tournesol) et les prix des graines de colza (4 points de pourcentage) et de tournesol (2 points de pourcentage). A l'inverse, le développement de la consommation de biocarburants de 2004 à 2009 en France aurait contribué à tirer à la baisse les prix des coproduits, à hauteur de 5 points de pourcentage pour le tourteau de colza, de 4 points de pourcentage pour le tourteau de tournesol, de 3 points de pourcentage pour le tourteau de soja, de 4 points de pourcentage pour les drêches de maïs, le prix de la pulpe restant inchangé.

Le développement de la consommation française de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait en revanche eu peu d'effet sur les prix mondiaux des céréales. L'impact sur le prix mondial du sucre aurait également été très limité : le développement de la consommation française de biocarburants aurait contribué à soutenir le prix du sucre à hauteur de 1 point de pourcentage.

2.4.2 Impacts sur les surfaces cultivées

Dans le scénario de référence, les surfaces cultivées en oléagineux en France ont augmenté de 25% entre 2004 et 2009. Les résultats de simulation du scénario CARBFR par exemple indiquent que sur ces 25% d'augmentation, seuls 1,7 point de pourcentage (correspondant au 31 000 ha évoqués précédemment) sont dus au développement de la consommation française de biocarburants qui s'est opéré entre 2004 et 2009. En ce qui concerne la surface céréalière, la Figure 28 indique qu'elle diminue faiblement entre 2004 et 2009 dans le scénario de référence : -1%, le développement de la consommation française de biocarburants entre 2004 et 2009 contribuant à limiter cette baisse : -0,85% dans le scénario CARBFR. On retrouve ici les résultats déjà évoqués précédemment selon lesquels le développement de la consommation française de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait eu des effets très limités sur les surfaces cultivées en grandes cultures en France.

Figure 28 : Variation des surfaces cultivées en France entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels français

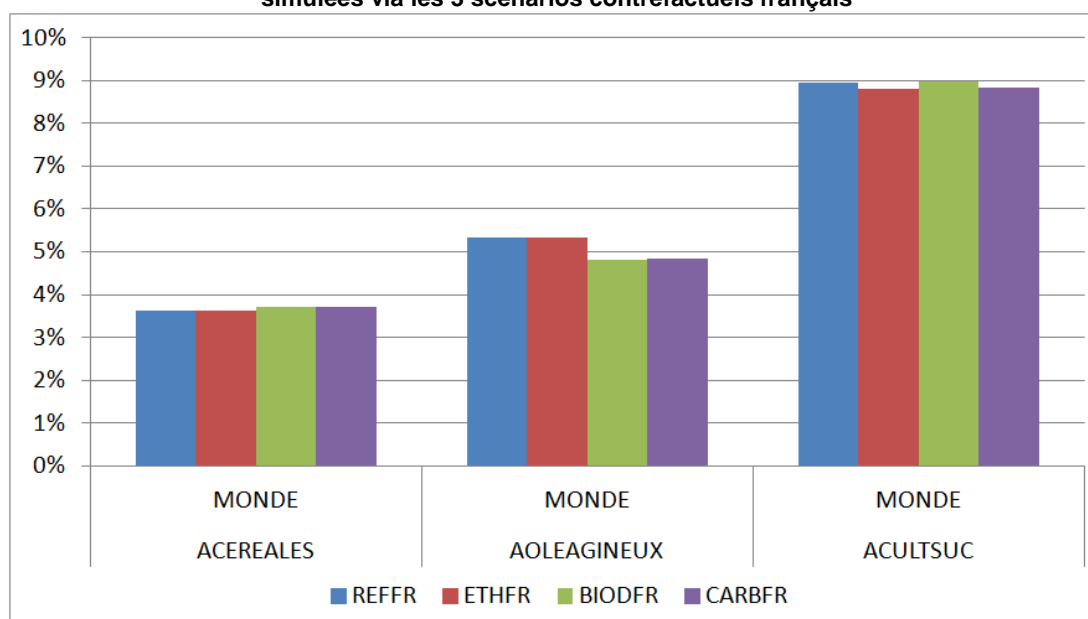


Source : Résultats de simulations

On retrouve des résultats analogues au niveau mondial. La Figure 29 indique que de 2004 à 2009, les surfaces cultivées en oléagineux dans le monde ont augmenté de 5,3%. Or si la consommation française de biocarburants était restée constante à son niveau de 2004, ces surfaces n'auraient augmenté que de 4,8%. On peut donc conclure que le développement de la consommation française de biocarburants entre 2004 et 2009 a contribué à accroître les superficies mondiales en oléagineux à hauteur de 0,5 point de pourcentage. Les effets sur les surfaces en cultures sucrières vont dans le

même sens mais sont très limités. Les effets sur les surfaces en céréales vont dans le sens inverse et sont également très limités.

Figure 29 : Variation des surfaces cultivées au niveau mondial entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels français



Source : Résultats de simulations

3. Résultats de simulations des scénarios UE

Nous analysons ici les résultats de simulations des 3 scénarios contrefactuels définis pour l'UE. Pour mémoire, le scénario BIODUE ramène la consommation communautaire de biodiesel de son niveau observé en 2009 (10,674 millions de tonnes) à son niveau observé en 2004 (1,902 million de tonnes), soit une réduction de -8,77 millions de tonnes. Le scénario ETHUE effectue la même opération sur la consommation communautaire d'éthanol, soit une réduction de -2,79 millions de tonnes. Le scénario CARBUE combine les 2 scénarios précédents.

De manière très générale, les ajustements sur les différents marchés et leurs enchaînements sont similaires à ceux décrits en détails pour la France dans la section précédente. Ils ne sont pas repris intégralement ici et nous mettons l'accent sur les effets des 3 scénarios sur les prix mondiaux et sur les surfaces cultivées. En revanche, les chocs imprimés ici sont 4 à 5 fois supérieurs à ceux appliqués dans les scénarios français. Ils induisent donc certains ajustements qui étaient très peu visibles dans le cas des scénarios français et qui seront donc détaillés ici.

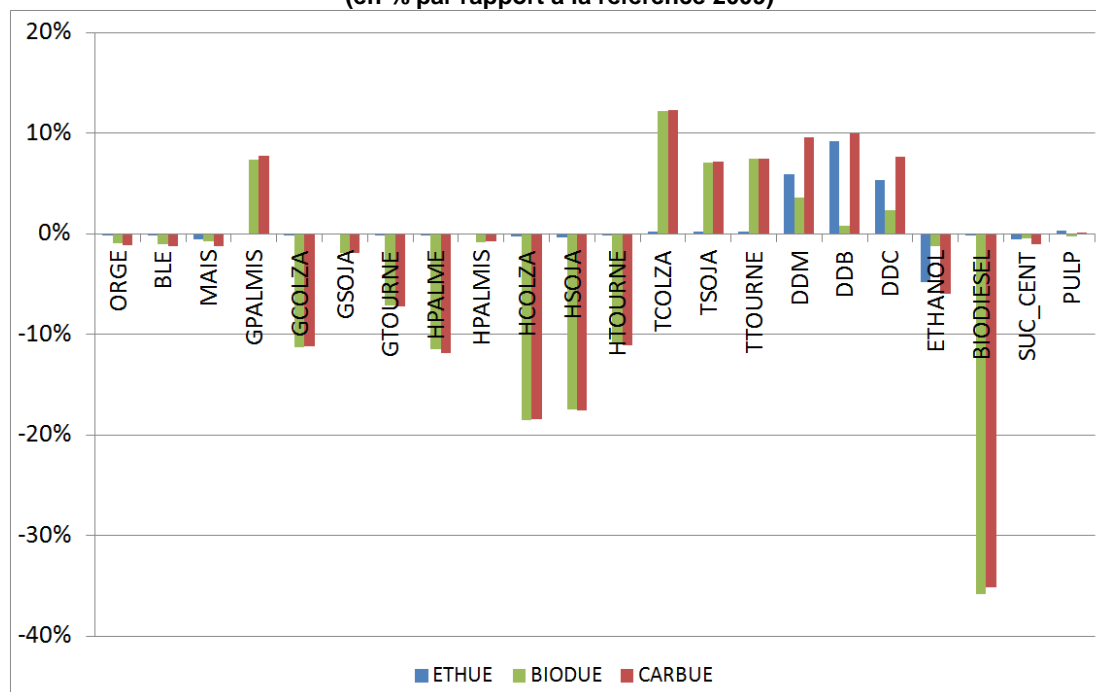
3.1. Impacts des 3 scénarios sur les prix mondiaux

La Figure 30 suggère que les effets sur les prix mondiaux des 3 scénarios BIODUE, ETHUE et CARBUE sont très semblables à ceux de leurs homologues français mais que l'ampleur des ajustements est ici nettement plus marquée.

Ainsi, si la consommation communautaire de biodiesel était restée à son niveau observé en 2004 (scénario BIODUE) alors le prix du biodiesel aurait été inférieur de 36% à son niveau observé en 2009. Les prix des huiles auraient également été inférieurs à leur niveau de 2009 : -18% pour l'huile de colza, -18% pour l'huile de soja, -12% pour l'huile de palme, -11% pour l'huile de tournesol. Comme dans le cas des scénarios français, la réduction des prix des huiles se transmet de façon variable aux graines selon leur contenu respectif en huile et en tourteau. Ainsi, si la consommation communautaire de biodiesel était restée à son niveau de 2004, les prix des graines de colza et de tournesol auraient été inférieurs de -11% et de -7% respectivement par rapport à leur niveau observé en 2009, tandis que le prix de la graine de soja aurait été peu impacté (-2%). Les prix des tourteaux, produits en moins grande quantité, auraient, quant à eux, enregistré une hausse : +12% pour le

tourteau de colza, +7% pour le tourteau de soja, par rapport à la référence 2009. Ils auraient été remplacés dans les rations animales par des coproduits de la production d'éthanol, dont les prix auraient par suite augmenté (+0,7 à +4% pour les drêches de différents céréales), et par des céréales. Le surcroît de demande en céréales ne parvenant pas à compenser l'accroissement de l'offre, les prix des céréales s'ajustent finalement légèrement à la baisse (de -1 à -2%).

Figure 30 : Variations des prix mondiaux issues des 3 scénarios contrefactuels UE (en % par rapport à la référence 2009)



Source : Résultats de simulations

Si la consommation communautaire d'éthanol était restée à son niveau de 2004 (scénario ETHUE) alors le prix mondial de l'éthanol aurait été inférieur de 5% à son niveau observé en 2009. Comme dans le cas du scénario français, un report de la production d'éthanol vers la production de sucre se serait opéré (essentiellement au Brésil) entraînant un léger ajustement à la baisse du prix mondial du sucre (-0,6% par rapport à la référence 2009). De la même manière, la production américaine d'éthanol se serait ajustée à la baisse entraînant une diminution du prix mondial du maïs (-0,5%). La production d'éthanol se réduisant, celle de coproduits d'éthanol aurait diminué également induisant une augmentation de leurs prix mondiaux (de +5% pour les drêches de maïs et d'autres céréales à +9% pour les drêches de blé). La production de pulpe aurait également été réduite du fait de la moindre utilisation de betteraves pour la production d'éthanol et de sucre, le prix des pulpes s'ajustant donc légèrement à la hausse. Les coproduits d'éthanol étant devenus plus onéreux, ils auraient été remplacés par des tourteaux dans les rations animales, ce surcroît de demande tirant très légèrement à la hausse les prix mondiaux des tourteaux.

L'impact sur les prix mondiaux du scénario CARBUE correspond à peu près à la somme des impacts des scénarios BIODUE et ETHUE.

3.2. Impacts sur les marchés communautaires

Le Tableau 23 rapporte les impacts du scénario CARBUE sur les marchés communautaires du biodiesel, de l'éthanol et des différentes grandes cultures. Les effets et leurs enchaînements sont similaires à ceux décrits dans le cas des scénarios français. Nous ne soulignons par conséquent que les traits qui différencient les impacts du scénario européen par rapport au scénario français correspondant.

Tableau 23 : Impacts du scénario CARBUE sur les marchés communautaires des biocarburants et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009)

	MPbio	PROD	FOOD	FEED	TRIT	INDUS	BALANCE
ORGE	0,000	0,267	0,008	0,201	0,000	0,000	0,059
BLE	0,026	0,468	0,074	0,342	0,000	0,000	0,026
MAIS	-0,054	0,168	0,014	0,263	0,000	0,000	-0,055
CERDI	-0,008	0,190	0,008	0,157	0,000	0,000	0,032
POIS	0,000	0,105	-0,002	0,236	0,000	0,000	-0,129
GCOLZA	0,000	-2,113	0,000	0,000	-4,477	0,000	2,363
GSOJA	0,000	-0,003	0,000	0,000	2,028	0,000	-2,031
GTOURNE	0,000	-0,366	0,002	0,000	0,768	0,000	-1,137
HPALME	-0,568	0,000	-0,145	0,000	0,000	0,000	0,713
HCOLZA	-3,241	-1,869	0,525	0,000	0,000	0,000	0,847
HSOJA	-0,624	0,369	0,204	0,000	0,000	0,000	0,789
HTOURNE	-0,184	0,326	-0,245	0,000	0,000	0,000	0,756
TCOLZA	0,000	-2,547	0,000	-1,237	0,000	0,000	-1,311
TSOJA	0,000	1,603	0,000	-0,231	0,000	0,000	1,834
TTOURNE	0,000	0,413	0,000	-0,075	0,000	0,000	0,489
DDM	0,000	-0,020	0,000	-0,031	0,000	0,000	0,011
DDB	0,000	0,008	0,000	-0,031	0,000	0,000	0,038
DDC	0,000	-0,002	0,000	-0,002	0,000	0,000	-0,001
ETHANOL	0,000	-0,045	0,000	0,000	0,000	-2,796	2,751
BIODIESEL	0,000	-4,471	0,000	0,000	0,000	-8,772	4,301
BET_SUC	-0,393	-0,462	0,000	0,000	0,000	-0,069	0,000
CAN_SUC	0,000	-0,007	0,000	0,000	0,000	-0,007	0,000
SUC_CENT	0,000	-0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,013
PULP	0,000	-0,023	0,000	-0,027	0,000	0,000	0,004
CEREALES	-0,036	1,084	0,116	0,963	0,000	0,000	0,040
GRAINES	0,000	-2,497	0,006	0,000	-1,711	0,000	-0,792
HUILES	-4,618	-1,179	0,190	0,000	0,000	0,000	3,248
TOURTEAUX	0,000	-0,545	0,000	-1,682	0,000	0,000	1,138
COPRODUITS	0,000	-0,015	0,000	-0,063	0,000	0,000	0,049
CULTURES SUCRIERES	-0,393	-0,469	0,000	0,000	0,000	-0,075	0,000

Source : Résultats de simulation

Nous remarquons tout d'abord que le choc imprimé par le scénario CARBUE à la consommation communautaire de biodiesel (-8,77 millions de tonnes) est transmis beaucoup plus fortement à la production communautaire de biodiesel que dans le cas du scénario français : la production communautaire de biodiesel se réduit ici de -4,5 millions de tonnes (soit 51% du choc initial sur la consommation contre 12% dans le cas du scénario français). Ceci est dû à la plus forte baisse du prix

du biodiesel et au moindre degré de liberté du report de l'ajustement de production vers les autres pays, l'essentiel du biodiesel étant produit en Europe (près de 60% de la production mondiale). Suite à cet ajustement, l'UE passe d'une situation d'importatrice nette de biodiesel (à hauteur de -1,8 Mt) à une situation d'exportatrice nette de biodiesel (à hauteur de 2,5 Mt). La Figure 31 (panel de gauche) indique que les échanges (nets) de biodiesel se modifient sensiblement suite au choc imprimé à la consommation communautaire de biodiesel. Tandis que l'UE (y compris la France) passe d'une situation d'importatrice nette à une situation d'exportatrice nette, le Brésil, les Etats-Unis, la Thaïlande et l'Asie du Sud Est, deviennent importateurs nets de biodiesel. Le Canada et surtout l'Argentine restent quant à eux exportateurs nets de biodiesel.

La diminution de 4,5 millions de tonnes de la production communautaire de biodiesel se traduit par une réduction proportionnelle de l'utilisation d'huiles pour le biodiesel (-4,6 millions de tonnes), touchant essentiellement l'huile de colza (-3,241 millions de tonnes), puis celles de soja (-624 000 tonnes) et de palme (-568 000 tonnes).

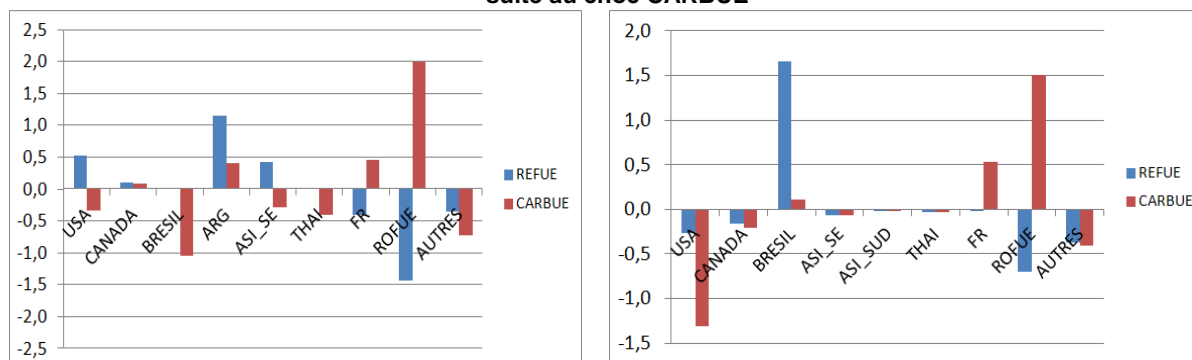
Cette baisse des utilisations d'huiles végétales conduit à une baisse générale du prix des huiles qui conduit à des réallocations et à un accroissement de la consommation alimentaire globale d'huiles de 190 000 tonnes en Europe (1,8 % de la consommation). Ce chiffre masque une hausse des consommations des huiles de colza et de soja, huiles les plus affectées par les baisses de prix, et une baisse des consommations des autres huiles végétales (surtout de l'huile de tournesol et de palme).

La réduction de la production communautaire d'huiles se limite à -1,179 million de tonnes seulement, du fait du colza dont la production diminue de -1,869 million de tonnes. Ce sont donc les échanges avec les autres pays du monde qui permettent de rétablir l'équilibre avec une réduction des importations globales d'huiles de -3,25 millions de tonnes. L'UE devient même exportatrice nette d'huile de colza et de soja en améliorant son solde commercial de 847 000 tonnes et 789 000 tonnes respectivement.

Le marché des tourteaux est corrélé pour sa part à celui des huiles. La réduction de la production communautaire d'huile entraîne une réduction proportionnelle de la production de tourteaux qui a un effet positif sur leurs prix. Les tourteaux plus chers sont donc moins utilisés en alimentation animale (-1,682 million de tonnes par rapport à la référence 2009). Cette réduction est supportée surtout par les tourteaux de colza et de soja (-1,2 million de tonnes et -231 000 tonnes respectivement) qui sont remplacés dans les rations par des céréales et du pois essentiellement.

Comme dans le cas du scénario français, la production communautaire d'éthanol ne s'ajuste que partiellement à la contraction de la consommation communautaire d'éthanol portée par le scénario CARBUE. Alors que cette dernière diminue de 2,79 millions de tonnes, la production n'est réduite que de 45 000 tonnes dans l'UE. Ainsi, l'UE devient exportatrice nette d'éthanol (à hauteur de 2,030 Mt, cf. Figure 31, panel de droite), gagnant des parts de marché sur le Brésil, dont les exportations nettes diminuent considérablement (passant de 1,6 million à 105 000 tonnes). On retrouve ici un résultat déjà rencontré dans le cas du scénario français ETHFR : le Brésil peut très facilement déplacer sa production de l'éthanol vers le sucre. Ainsi, lorsque le prix de l'éthanol diminue, la réponse brésilienne en termes de contraction de la production d'éthanol et d'expansion de la production de sucre est relativement forte. Dans le scénario CARBUE, le Brésil réduit sa quantité de canne à sucre utilisée pour la production d'éthanol de 24 millions de tonnes et augmente sa quantité de canne à sucre utilisée pour la production de sucre de 5,7 millions de tonnes.

Figure 31 : Echanges nets de biodiesel (panel de gauche) et échanges nets d'éthanol (panel de droite) suite au choc CARBUE



Source : Résultats de simulations

La contraction de la production communautaire d'éthanol induit une légère réduction de la consommation de céréales à des fins énergétiques (-36 000 tonnes par rapport à la référence 2009). L'offre communautaire de céréales augmente pourtant (1,084 million de tonnes) sous un double effet de substitution :

- du côté de l'offre d'abord puisque les prix moins avantageux des graines oléagineuses favorisent la production de céréales ;
- du côté de la demande animale ensuite puisque les prix moins avantageux des tourteaux et des coproduits de l'éthanol favorisent la consommation animale de céréales, ce qui soutient leurs prix.

Au total, la baisse de la consommation animale de tourteaux (-1,682 Mt) et de coproduits de l'éthanol (-63 000 tonnes de drèches et -27 000 tonnes de pulpe) n'est pas entièrement compensée par l'augmentation de la consommation animale de céréales (+963 000 tonnes) et de pois (+236 000 tonnes). La demande animale communautaire d'aliments concentrés diminue d'environ 0,25% par rapport à la situation observée en 2009.⁶

3.3. Impacts sur les marchés mondiaux

Synthèse des impacts sur les marchés mondiaux du scénario biocarburants Europe (CARBUE) :

La contraction de la consommation communautaire de biodiesel et d'éthanol, portée par le scénario CARBUE, conduit à des ajustements sur les marchés mondiaux analogues à ceux décrits dans le cas des scénarios français. L'ampleur des ajustements est néanmoins ici nettement plus marquée (cf. Tableau 24). Parmi ces effets plus marqués, notons :

- La réduction de la quantité d'huiles utilisée pour le biodiesel (-9,1 Mt) largement transmise à la production d'huiles (-7,6 Mt), le solde étant absorbé par l'alimentation humaine (+1,4 Mt). Nous constatons un fort ajustement à la baisse de la production d'huiles de palme et de tournesol qui ne bénéficient pas en effet, comme les autres huiles, d'un surcroît de demande humaine. La diminution plus forte des prix des huiles de colza et de soja favorise ces dernières dans l'alimentation humaine conduisant à un retrait des huiles de palme et de tournesol.

- La réduction de la quantité de canne à sucre utilisée pour l'éthanol (-24,6 Mt) transmise assez fortement également à la production de canne (-21,1 Mt), le solde étant reporté sur la production de sucre (+3,2 Mt).

- La réduction de la quantité de betteraves utilisée pour l'éthanol (-0,4 Mt) qui, elle, n'est pas reportée sur la production de sucre, le sucre de betterave subissant la concurrence accrue du sucre de canne. Ce qui explique l'ajustement important à la baisse de la production de betteraves (-1,1 Mt) par rapport à la baisse de la demande pour l'éthanol.

- La réduction de la quantité de maïs utilisée pour l'éthanol (-3,5 Mt), peu transmise à la production (-0,653 Mt), le solde étant absorbé par l'augmentation de l'utilisation du maïs dans l'alimentation animale (+2,835 Mt) et, dans une bien moindre mesure, dans l'alimentation humaine (+0,052 Mt).

⁶ Nous ne mentionnons pas ici les demandes animales de graines et d'huiles oléagineuses qui sont exogènes dans notre modèle (et qui ne varient donc pas par rapport à la situation de référence). Compte tenu des tonnages marginaux de ces produits entrant dans les rations animales, ceci ne biaise pas significativement nos résultats.

- L'augmentation de la production des autres céréales (+1,1 Mt) et du pois (+0,4 Mt) qui, du côté de l'offre, bénéficient de la baisse de la production des graines oléagineuses et des surfaces qu'elles libèrent et, du côté de la demande animale, bénéficient de la moindre compétitivité des tourteaux et des coproduits de la production d'éthanol.

Tableau 24 : Impacts du scénario CARBUE sur les marchés mondiaux des biocarburants et des grandes cultures (en Mt par rapport à la référence 2009)

	MPbio	PROD	FOOD	FEED	TRIT	INDUS
ORGE	0,000	0,436	0,005	0,431	0,000	0,000
RIZ	0,000	0,983	0,983	0,000	0,000	0,000
BLE	-0,176	0,582	0,124	0,634	0,000	0,000
MAIS	-3,541	-0,653	0,052	2,835	0,000	0,000
CERDI	-0,010	0,376	0,030	0,356	0,000	0,000
POIS	0,000	0,387	-0,009	0,396	0,000	0,000
GCOLZA	0,000	-5,037	0,000	0,000	-5,037	0,000
GSOJA	0,000	-2,016	0,027	0,000	-2,043	0,000
GTOURNE	0,000	-1,708	0,012	0,000	-1,720	0,000
HPALME	-2,157	-3,196	-1,039	0,000	0,000	0,000
HCOLZA	-3,729	-2,166	1,564	0,000	0,000	0,000
HSOJA	-2,883	-0,391	2,492	0,000	0,000	0,000
HTOURNE	-0,184	-0,901	-0,716	0,000	0,000	0,000
TPALMIS	0,000	-0,452	0,000	-0,452	0,000	0,000
TCOLZA	0,000	-2,826	0,000	-2,826	0,000	0,000
TSOJA	0,000	-1,595	-0,002	-1,593	0,000	0,000
TTOURNE	0,000	-0,200	-0,001	-0,199	0,000	0,000
DDM	0,000	-1,310	0,000	-1,310	0,000	0,000
DDB	0,000	-0,053	0,000	-0,053	0,000	0,000
DDC	0,000	-0,003	0,000	-0,003	0,000	0,000
ETHANOL	0,000	-2,796	0,000	0,000	0,000	-2,796
BIODIESEL	0,000	-8,772	0,000	0,000	0,000	-8,772
BET_SUC	-0,393	-1,115	0,000	0,000	0,000	-0,722
CAN_SUC	-24,568	-21,059	0,308	0,000	0,000	3,200
SUC_CENT	0,000	0,118	0,118	0,000	0,000	0,000
PULP	0,000	-0,056	0,000	-0,056	0,000	0,000
CEREALES	-3,727	1,724	1,195	4,257	0,000	0,000
GRAINES ⁷	0,000	-11,153	0,119	0,000	-27,350	0,000
HUILES	-9,092	-7,648	1,444	0,000	0,000	0,000
TOURTEAUX	0,000	-5,666	-0,003	-5,663	0,000	0,000

⁷ Il est à noter que la somme des graines d'oléagineux intègre également le fruit de palme pour la colonne « trituration », alors que dans les autres colonnes celui-ci est exclu.

COPRODUITS	0,000	-1,366	0,000	-1,366	0,000	0,000
CULTURES SUCRIERES	-24,961	-22,174	0,308	0,000	0,000	2,479

Source : Résultats de simulation

3.4. Impacts sur les surfaces cultivées

Le Tableau 25 rapporte les résultats de simulations des trois scénarios européens BIODUE, ETHUE et CARBUE en termes de surfaces cultivées au niveau mondial.

Si la consommation communautaire de biocarburants avait été maintenue à son niveau observé en 2004 (scénario CARBUE), la surface cultivée en grandes cultures au niveau mondial aurait été inférieure de 2,179 millions d'hectares par rapport à son niveau observé en 2009. Cette perte de surface aurait résulté de la contraction des surfaces en oléagineux (-4,416 Mha, principalement colza, tournesol et palme) et en cultures sucrières (-178 000 ha, principalement canne à sucre) compensée par l'extension des surfaces en céréales (+2,239 Mha) et en pois (+175 000 ha).

Synthèse des CAS dans le monde des scénarios Europe BIODUE, ETHUE et CARBUE :

Selon nos résultats, l'augmentation de la consommation de biocarburants qui s'est opérée dans l'UE entre 2004 et 2009 aurait eu un impact global en termes de changement d'affectation des sols relativement limité. Un peu plus de 2 millions d'hectares (2,179 millions) auraient été déplacés en provenance d'autres usages (dont prairies et forêts) vers l'usage en grandes cultures, ce qui représente 0,23% de la surface mondiale en grandes cultures observée en 2009.

Sur les 2,179 millions d'hectares déplacés, 1,8 million d'hectares auraient résulté du développement de la consommation communautaire de biodiesel (soit 0,19% de la surface mondiale en grandes cultures observée en 2009, scénario BIODUE) et 382 000 hectares auraient résulté du développement de la consommation communautaire d'éthanol (soit 0,04% de la surface mondiale en grandes cultures de 2009, scénario ETHUE).

Tableau 25 : Impacts des scénarios ETHUE, BIODUE et CARBUE sur les surfaces en grandes cultures au niveau mondial (variations par rapport à la référence 2009)

	2009 (Mha)	ETH09(Mha)	ETH09(%)	BIOD09(Mha)	BIOD09(%)	CARB09(Mha)	CARB09(%)
ACEREALES	693,914	-0,346	-0,05%	2,603	0,38%	2,239	0,32%
AOLEAGINEUX	231,599	0,149	0,06%	-4,600	-1,99%	-4,416	-1,91%
ACULTSUC	28,093	-0,194	-0,69%	0,018	0,06%	-0,178	-0,63%
APOIS	6,216	0,009	0,14%	0,169	2,72%	0,175	2,82%
Total cultures	959,822	-0,382	-0,04%	-1,810	-0,19%	-2,179	-0,23%
AORGE	55,668	0,006	0,01%	0,250	0,45%	0,253	0,46%
ARIZ	156,020	0,025	0,02%	0,456	0,29%	0,481	0,31%
ABLE	227,166	-0,035	-0,02%	0,743	0,33%	0,696	0,31%
AMAI	157,763	-0,340	-0,22%	0,819	0,52%	0,476	0,30%
ACERDI	97,297	-0,001	0,00%	0,335	0,34%	0,332	0,34%
AGCOPRAH	11,552	-0,001	-0,01%	-0,487	-4,22%	-0,486	-4,20%
AGCOTON	29,424	0,020	0,07%	-0,025	-0,09%	-0,006	-0,02%
AGPALME	14,886	-0,002	-0,02%	-0,724	-4,86%	-0,736	-4,95%
AGARACHI	20,395	0,005	0,02%	-0,396	-1,94%	-0,388	-1,90%
AGCOLZA	31,092	0,004	0,01%	-1,665	-5,35%	-1,633	-5,25%
AGSOJA	102,170	0,122	0,12%	-0,442	-0,43%	-0,313	-0,31%
AGTOURNE	22,080	0,002	0,01%	-0,862	-3,90%	-0,854	-3,87%
ABET_SUC	3,303	-0,012	-0,36%	0,004	0,12%	-0,008	-0,24%
ACAN_SUC	23,819	-0,183	-0,77%	0,010	0,04%	-0,174	-0,73%

Source : Résultats de simulations

Le Tableau 26 indique que, comme dans le cas des scénarios français, les déplacements de surfaces entre grandes cultures et autres usages, induits par les scénarios européens (ici le scénario CARBUE), s'opèrent, pour la plus large part, non pas dans l'UE mais à l'étranger.

Ainsi, sur le total de -2,179 million d'hectares déplacés par le scénario CARBUE, seuls -211 000 hectares le sont dans l'UE (-52 000 hectares en France et -159 000 hectares dans le reste de l'UE). Les déplacements les plus importants ont lieu en Afrique sub-saharienne (-325 000 hectares), au Brésil (-322 000 hectares), dans l'ex-URSS (-285 000 hectares), et en Chine (-271 000 hectares).

Tableau 26 : Impacts du scénario CARBUE sur les surfaces en grandes cultures par pays et zones du modèle (variations en Mha par rapport à la référence 2009)

Zone	ACEREALES	ACULTSUC	AOLEAGINEUX	APOIS	Total général
AFR_NOR	-0,012	-0,001	-0,010	0,001	-0,022
AFR_SUB	0,246	-0,003	-0,581	0,013	-0,325
ARG	0,022	0,000	-0,110	0,001	-0,088
ASI_EST	-0,007	0,000	-0,002	0,000	-0,009
ASI_SE	0,629	0,011	-0,665	0,000	-0,025
ASI_SUD	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
AUS	0,027	-0,001	-0,108	0,008	-0,075
AUTRES	0,051	-0,006	-0,260	0,006	-0,209
BRESIL	-0,019	-0,171	-0,132	0,000	-0,322
CANADA	0,210	0,000	-0,371	0,056	-0,104
CHINE	0,322	0,000	-0,618	0,025	-0,271
EX_URSS	0,318	-0,002	-0,638	0,037	-0,285
FR	0,072	0,001	-0,129	0,004	-0,052
MEX	-0,003	-0,002	-0,016	0,000	-0,021
UE Hors FR	0,314	0,000	-0,488	0,014	-0,159
THAI	0,024	-0,001	-0,051	0,000	-0,027
USA	0,044	-0,002	-0,237	0,009	-0,186
Total général	2,239	-0,178	-4,416	0,175	-2,179

Source : Résultats de simulation

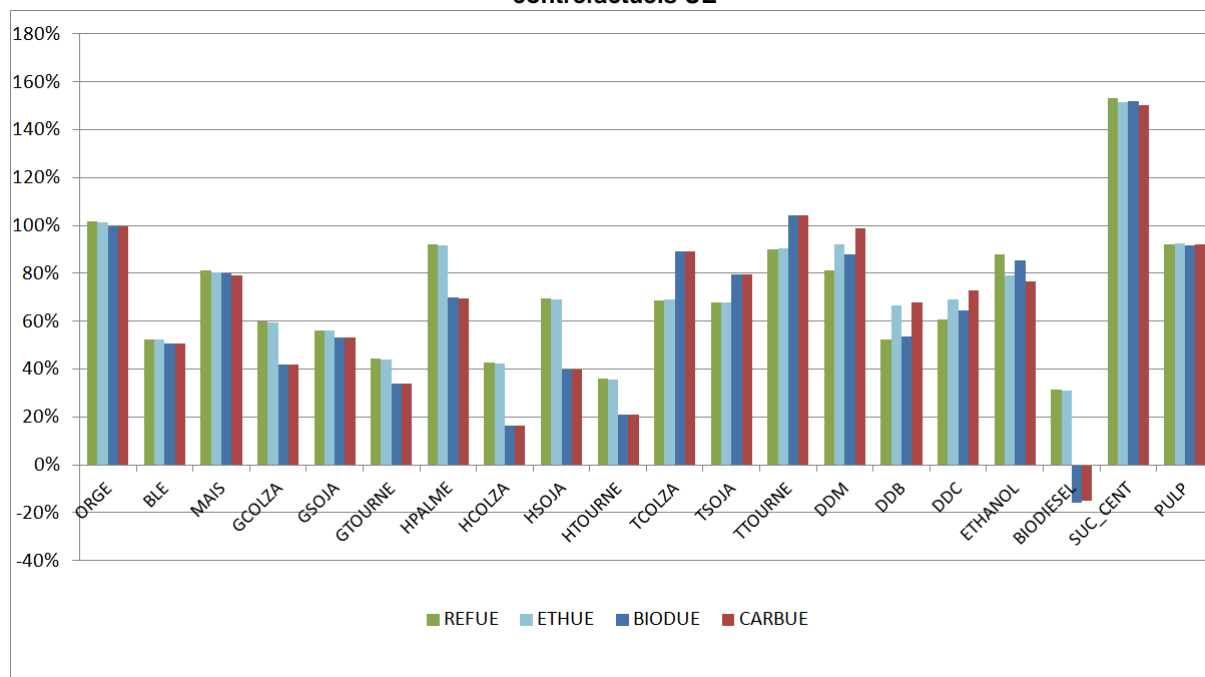
3.5. Synthèse des résultats de simulation des 3 scénarios contrefactuels européens : BIODUE, ETHUE et CARBUE

Nous résumons dans ce paragraphe les impacts en termes de prix et de surfaces cultivées des 3 scénarios UE. Nous raisonnons sur les évolutions des prix et des surfaces cultivées entre 2004 et 2009 et nous mettons en évidence la contribution à ces évolutions du développement de la consommation communautaire de biodiesel, d'éthanol ou du total biocarburants. Dans toutes les figures présentées dans ce paragraphe, la barre la plus à gauche représente la variation de la variable considérée réellement observée entre 2004 et 2009 (scénario REFUE).

3.5.1 Impacts sur les prix mondiaux

La Figure 32 rapporte les variations en pourcentage des prix mondiaux des différents produits observées entre 2004 et 2009 (REFUE) et obtenues à l'issue des trois scénarios contrefactuels (BIODUE, ETHUE et CARBUE).

Figure 32 : Variations des prix mondiaux entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels UE



Source : Résultats de simulation

Le prix mondial de l'huile de colza a augmenté de 43% entre 2004 et 2009, de 650 USD/t à 927 USD/t (scénario REFUE). Lorsque la consommation communautaire de biocarburants est maintenue à son niveau de 2004 (scénario CARBUE), le prix mondial de l'huile de colza augmente de « seulement » 16% (pour s'établir à 756 USD/t en 2009). Le développement de la consommation communautaire de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait donc contribué à accroître le prix mondial de l'huile de colza à hauteur de 26 points de pourcentage (ce qui représente 60% de la variation observée sur la période 2004-2009). En ce qui concerne les autres huiles, la contribution du développement de la consommation communautaire de biocarburants à l'augmentation de leurs prix se serait établie à 30 points de pourcentage pour l'huile de soja (soit 43% de son évolution observée entre 2004 et 2009), 23 points de pourcentage pour l'huile de palme (25% de son évolution observée) et 15 points de pourcentage pour l'huile de tournesol (42% de son évolution observée).

A l'inverse, le développement de la consommation communautaire de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait contribué à diminuer les prix mondiaux des tourteaux et des coproduits de l'éthanol. Par exemple, le prix mondial du tourteau de colza a augmenté de 69% entre 2004 et 2009 (scénario REFUE). Lorsque la consommation communautaire de biocarburants est maintenue à son niveau de 2004 (scénario CARBUE), le prix du tourteau de colza s'accroît de 89%. Le développement de la consommation communautaire de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait donc contribué à réduire le prix mondial du tourteau de colza à hauteur de 20 points de pourcentage (soit 29% de son évolution observée). Les prix des autres tourteaux et des coproduits de l'éthanol connaissent des évolutions analogues entre 2004 et 2009 et le développement de la consommation communautaire de biocarburants joue dans le même sens, mais dans des proportions variables selon les produits : 12 points de pourcentage pour le tourteau de soja, 17 points de pourcentage pour les drêches de maïs, mais seulement 0,05 point de pourcentage pour la pulpe de betteraves par exemple.

D'après nos résultats, le développement de la consommation communautaire de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait beaucoup moins affecté les prix mondiaux des céréales. Ainsi, le prix du blé a augmenté de 52,5% entre 2004 et 2009 (scénario REFUE). A consommation communautaire de biocarburants fixée à son niveau 2004 (scénario CARBUE), le prix du blé aurait augmenté de 50,6%. Le développement de la consommation communautaire de biocarburants aurait donc contribué à accroître le prix mondial du blé à hauteur d'à peine 2 points de pourcentage. L'impact sur le prix mondial du maïs aurait été légèrement plus fort : +79,2% dans le scénario CARBUE contre +81,4% dans le scénario REFUE (soit 2,2 points de pourcentage ou 2,7% de la variation observée). L'impact sur le prix mondial du sucre aurait été également limité : +150,4% dans le scénario CARBUE contre

+153,2% dans le scénario REFUE (soit presque 3 points de pourcentage ou 2% de la variation observée).

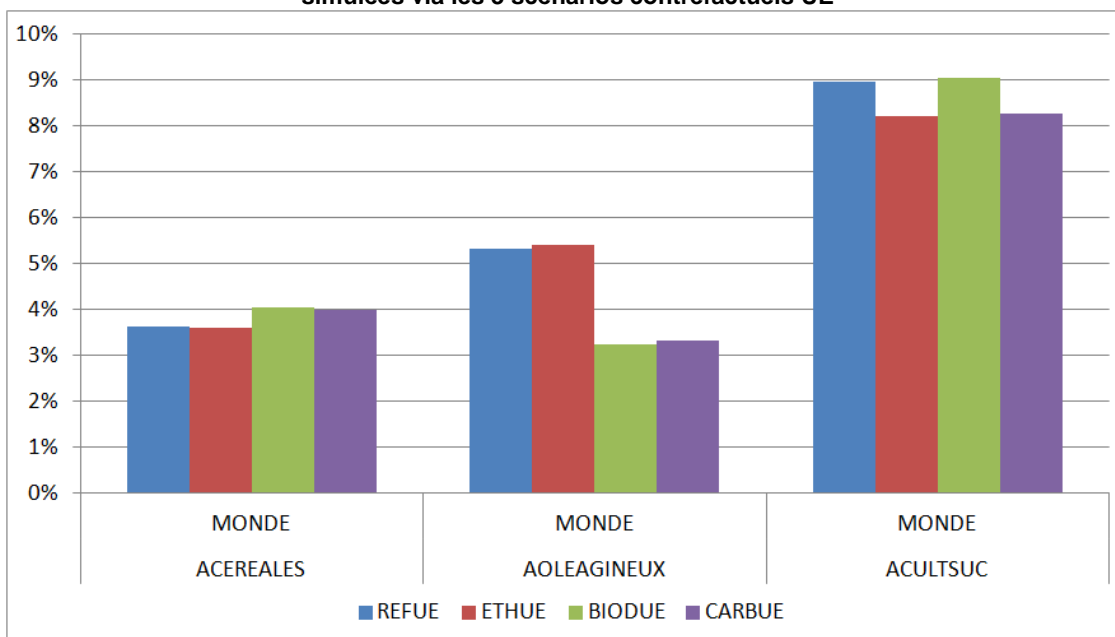
Enfin, l'impact du développement de la consommation communautaire de biocarburants de 2004 à 2009 sur les prix mondiaux des biocarburants eux-mêmes aurait été beaucoup plus fort pour le biodiesel que pour l'éthanol. Lorsque la consommation européenne de biocarburants est maintenue constante à son niveau de 2004 (scénario CARBUE), le prix de l'éthanol varie de 76% au lieu des 88% de hausse observée entre 2004 et 2009 (scénario REFUE) tandis que le prix du biodiesel diminue de -15% au lieu d'augmenter de +31%.

Nous ne commentons pas ici les différences entre les résultats deux scénarios ETHUE et BIODUE. Mentionnons simplement que, d'après nos résultats et comme dans le cas des scénarios français, l'accroissement de la consommation communautaire de biodiesel entre 2004 et 2009 aurait joué un rôle nettement plus important sur les prix mondiaux des différents produits de grandes cultures que celle d'éthanol. Ceci n'est pas vrai toutefois pour les prix du sucre et des coproduits qui apparaissent logiquement plus sensibles au développement de la consommation d'éthanol.

3.5.2 Impacts sur les surfaces cultivées

La Figure 33 rapporte les évolutions entre 2004 et 2009 des surfaces cultivées en grandes cultures au niveau mondial, observées et simulées via les 3 scénarios UE.

Figure 33 : Variation des surfaces cultivées au niveau mondial entre 2004 et 2009 : observées vs. simulées via les 3 scénarios contrefactuels UE



Source : Résultats de simulation

D'après nos résultats, ce sont les surfaces en oléagineux qui auraient été les plus tirées à la hausse par l'accroissement de la consommation communautaire de biocarburants entre 2004 et 2009. En effet, ces surfaces ont augmenté de 5,3% entre 2004 et 2009 (REFUE). Si la consommation communautaire de biocarburants était restée à son niveau de 2004 (CARBUE), les surfaces mondiales cultivées en oléagineux n'auraient augmenté que de 3,3% sur la même période. On peut donc conclure que le développement de la consommation communautaire de biocarburants aurait contribué à accroître les surfaces cultivées en oléagineux au niveau mondial à hauteur de 2 points de pourcentage, soit environ 40% de l'évolution observée sur 2004-2009. La Figure 33 suggère que les surfaces en cultures sucrières auraient également été soutenues, le développement de la consommation communautaire de biocarburants contribuant à hauteur de 0,7 point de pourcentage à leur extension (soit 7% de l'accroissement observé sur la période).

Enfin, d'après nos résultats, le développement de la consommation communautaire de biocarburants entre 2004 et 2009 aurait très faiblement pénalisé les surfaces en céréales au niveau mondial : ces dernières auraient augmenté de 4% (CARBUE) au lieu des 3,6% de hausse observée entre 2004 et 2009.

Chapitre III. Analyse de sensibilité des résultats à certains paramètres clés du modèle et comparaison avec les résultats d'autres études

1. Analyse des résultats en termes de changement d'affectation des sols (CAS) par unité d'énergie

Afin de rendre nos résultats comparables à ceux obtenus par d'autres études, il est utile d'exprimer les déplacements de surfaces obtenus dans nos simulations relativement aux chocs appliqués, exprimés en équivalent d'énergie. Nous pouvons ainsi exprimer nos résultats en termes de nombre d'hectares déplacés par unité d'énergie (en tonne équivalent pétrole, TEP, ou en terajoules, TJ) consommée sous forme de biocarburant.⁸ Le changement d'affectation des sols (CAS) exprimé ainsi se calcule de la façon suivante :⁹

$$CAS(\text{ha/TEP ou TJ}) = \frac{\text{surfaces déplacées (ha)}}{\text{taille du choc (TEP ou TJ)}}$$

Le Tableau 27 rapporte les résultats pour les scénarios « biodiesel » et « éthanol » français et européen. Le CAS calculé ainsi permet de tenir compte de la taille relative des chocs appliqués dans les différents scénarios d'une part, de l'écart entre les valeurs énergétiques des deux biocarburants d'autre part.

Tableau 27 : CAS issus des différents scénarios simulés

	Taille du choc			CAS		
	millions de tonnes	millions de TEP	millions de MJ	millions d'ha	ha/TEP	ha/TJ
Scénarios Biodiesel						
BIODFR	-1.986	-1.763	-74 040	-0.443	0.25	5.98
BIODUE	-8.772	-7.786	-327 028	-1.81	0.23	5.53
Scénarios Ethanol						
ETHFR	-0.556	-0.356	-14 969	-0.077	0.22	5.14
ETHUE	-2.796	-1.792	-75 277	-0.382	0.21	5.07

Source : Calculés à partir des résultats de simulations

Le Tableau 27 indique que pour une même quantité d'énergie, le CAS induit par le biodiesel est supérieur au CAS induit par l'éthanol. Ainsi, une tonne de biodiesel en équivalent pétrole « déplace » 0,23 (scénario communautaire) à 0,25 (scénario français) hectare alors qu'une tonne d'éthanol en équivalent pétrole « déplace » 0,21 à 0,22 hectare. De la même façon, une terajoule consommée en biodiesel « déplace » 5,5 à 6 hectares environ alors qu'une terajoule consommée en éthanol en « déplace » environ 5,1.

⁸ Les chocs appliqués dans nos scénarios portant sur les quantités consommées de biocarburants (en France ou dans l'UE), nous parlerons ici de quantités d'énergie consommées plutôt que de quantités d'énergie produites.

⁹ Nous appelons surfaces déplacées le solde de l'ensemble des réallocations de surfaces induites par les scénarios simulés : réallocation entre cultures à l'intérieur de la surface totale en grandes cultures et réallocation entre surface en grandes cultures et autres usages, agricoles ou non. Nos surfaces déplacées simulées correspondent donc, lorsqu'elles sont négatives, au nombre d'hectares passant d'un usage grandes cultures à un usage autre, lorsqu'elles sont positives, au nombre d'hectares passant d'un usage autre à un usage grandes cultures. Les surfaces déplacées simulées sont donc égales au solde de ce que l'on appelle communément dans la littérature le CAS direct et le CAS indirect.

Soulignons à ce stade la stabilité des résultats exprimés en ha/TEP ou en ha/TJ pour chaque biocarburant alors que les chocs appliqués dans les scénarios UE sont nettement supérieurs à ceux imprimés dans les scénarios français. Ceci confirme la cohérence de nos résultats.

Le Tableau 28 rapporte les CAS en ha/TEP issus d'autres études. De manière générale, pour les deux types de biocarburants, le Tableau 28 suggère que nos résultats sont supérieurs à ceux de Laborde (2011), obtenus avec le modèle MIRAGE. Pour le biodiesel, notre résultat s'approche tout de même de celui calculé par Laborde (2011) pour le biodiesel de tournesol. Pour l'éthanol en revanche notre résultat est nettement supérieur à ceux de Laborde (2011) qui apparaissent particulièrement faibles et, en tout état de cause, nettement inférieurs à l'ensemble des résultats existant dans les autres études.

En ce qui concerne le biodiesel, notre résultat est proche de ceux issus de AGLINK et de GTAP (en considérant la moyenne entre la production européenne et la production du sud-est asiatique), rapportés par Edwards et al. (2010) et de ceux fournis par Overmars (2011). Il est largement inférieur aux résultats obtenus par LEITAP et FAPRI, rapportés par Edwards et al. (2010). Pour l'éthanol, notre résultat est plutôt proche de ceux de IMPACT et de GTAP (en considérant le maïs US), rapportés par Edwards et al. (2010) et de ceux de Overmars (2011). Il est, en règle générale, inférieur aux résultats issus de LEITAP, FAPRI et AGLINK, rapportés par Edwards et al. (2010).

Le Tableau 28 révèle par ailleurs une forte hétérogénéité dans les résultats en termes de CAS par unité d'énergie obtenus par les diverses études existantes. Cette hétérogénéité est nettement marquée du côté de l'éthanol, elle est plus faible pour le biodiesel. Le niveau de CAS par unité d'énergie semble être très sensible à la matière première utilisée pour la production du biocarburant considéré et à l'origine du biocarburant. Ainsi, il semblerait, d'après le Tableau 28, que le CAS en ha par TEP pour l'éthanol de betterave et de canne à sucre soit moins élevé que le CAS en ha par TEP pour l'éthanol de maïs, lui-même inférieur au CAS en ha par TEP pour l'éthanol d'autres céréales.¹⁰ Enfin, soulignons que s'il est clair dans les résultats de Laborde (2011) que l'éthanol déplace nettement moins de surfaces que le biodiesel, ce moindre effet CAS induit par l'éthanol est beaucoup moins net dans les résultats rapportés par Edwards et al. (2010) ainsi que dans ceux de Overmars (2011).

¹⁰ Notons toutefois que ce classement est contredit par les résultats de Overmars (2011) pour qui c'est l'éthanol de céréales qui déplace le moins de surfaces, suivi de l'éthanol de betterave, puis de l'éthanol de canne à sucre.

Tableau 28 : Changement d'affectations des sols obtenus dans la littérature selon l'origine de la matière première utilisée pour produire le biocarburant (en ha/TEP)

CAS Biodiesel			CAS éthanol		
Etude Modèle	Origine de la matière première ha/TEP		Modèle	Origine de la matière première ha/TEP	
<i>Nos simulations :</i>					
MATSIM-LUCA	0.25	Mélange		0.22	Mélange
<i>Laborde 2011 :</i>					
Mirage	0.08	Palme	Mirage	0.02	Betterave
Mirage	0.16	Colza-Soja	Mirage	0.04	Maïs
Mirage	0.21	Tournesol	Mirage	0.06	Canne-blé
<i>Edwards et al. 2010 :</i>					
LEITAP	1.93	Biod UE	LEITAP	0.73	Eth France
LEITAP	0.43	Biod Indonésie	LEITAP	0.86	Maïs US
FAPRI	0.44	Biod UE	FAPRI	0.39	Eth UE
AGLINK	0.23	Biod UE	AGLINK	0.57	Eth UE
AGLINK	0.24	Biod US	AGLINK	0.51	Maïs US
			AGLINK	0.13	Canne brésil
GTAP	0.38	Biod UE	GTAP	0.79	Eth UE
GTAP	0.08	Biod Indo/Mal	GTAP	0.17	Maïs US
			IMPACT	0.22	Eth UE
			IMPACT	0.11	Maïs US
			IMPACT	0.12	Maïs UE
<i>Overmars, 2011 :</i>					
	0.26	Colza UE		0.18	Céréales UE
	0.45	Soja US-Arg		0.25	betteraves UE
	0.24	Palme		0.29	Canne

Le Tableau 29 exprime le choc appliqué dans le scénario BIODFR en équivalent surface. Il permet de comparer les effets surfaces « théoriques », calculés en ignorant l'ensemble des ajustements sur les différents marchés et les effets induits de substitution au niveau de l'offre et des demandes des différentes matières premières, aux effets surfaces simulés qui eux tiennent compte de ces ajustements et effets de substitution et donc de la nouvelle structure d'utilisation des diverses matières premières à des fins énergétiques.

Dans le scénario BIODFR, la production mondiale de biodiesel affectée par le choc est composée de 42% de biodiesel de colza, 33% de biodiesel de soja et 19% de biodiesel de palme, que complète du biodiesel de tournesol, de coprah et de coton à hauteur de 2% environ pour chaque matière première (colonne 1 du Tableau 29). Le choc de -1,986 million de tonnes appliqué à la consommation française de biodiesel, soit -2,056 Mt d'huiles (colonne 2), équivaut donc, étant donné les rendements en huile et les rendements à l'hectare des différentes graines observés en 2009, à une réduction « théorique » de la surface cultivée au niveau mondial de -2,316 millions d'hectares (équivalent à 7,807 Mt de graines oléagineuses, colonnes 4 et 3 du Tableau 29). La prise en compte de l'effet rendement obtenu à l'issue de la simulation n'a qu'un très faible impact sur cet effet surfaces « théoriques » : le remplacement des rendements observés en 2009 par ceux simulés pour la même année ne fait varier l'effet surfaces « théoriques » que de 8 000 hectares au total (colonne 5). En revanche, lorsque l'ensemble des ajustements sur les marchés et des effets de substitution induits sont pris en compte, l'effet surface est nettement moindre (en valeur absolue). La dernière colonne du Tableau 29 indique en effet que la réduction simulée des surfaces cultivées en oléagineux se limite à -1,006 million d'hectares. En outre, étant donné les rendements en huile et à l'hectare des différentes graines et les effets de substitution à l'offre et à la demande dans les différents pays et zones, les effets sont contrastés selon les produits oléagineux. Ainsi la comparaison des colonnes 5 et 6 du Tableau 29

montre qu'en simulation la surface déplacée en colza est moindre que son homologue « théorique », la surface déplacée en soja est nettement inférieure à son homologue « théorique », les surfaces déplacées en palme, tournesol et coprah sont supérieures à leurs homologues « théoriques ». Ces écarts entre surfaces « théoriques » et surfaces simulées provient essentiellement du fait que le choc appliqué dans BIODFR concerne en majorité du biodiesel fabriqué à base de colza cultivé dans l'UE, cette zone présentant de meilleurs rendements que les autres zones du monde (1,2 TEP par hectare de colza)¹¹. Ce type de biodiesel est donc remplacé, en partie du moins, par du biodiesel fabriqué à base d'autres huiles, issues d'autres zones, présentant de moins bons rendements (0,47 TEP par hectare de soja par exemple) et/ou donnant lieu à une faible production de coproduits sous forme de tourteaux (3,69 TEP par hectare de palme par exemple mais pratiquement sans coproduit). Ce qui provoque des effets de substitution à l'offre et à la demande.

Enfin, la production de tourteaux, en baisse suite au choc appliqué dans BIODFR, doit être remplacée par une production supplémentaire d'autres ingrédients pour l'alimentation animale qui requière des surfaces qui viennent compenser partiellement la diminution des surfaces en oléagineux : + 0,563 Mha d'autres cultures (colonne 6 du Tableau 29).

¹¹ Se référer à l'annexe B pour quelques repères sur la valeur énergétique et la production de coproduits des principales cultures

Tableau 29 : Décomposition des effets du choc biodiesel BIODFR

	Origine du biodiesel affecté par le choc (1)	Origine des huiles végétales affectées par le choc (2)	Quantités de graines oléagineuses théoriquement affectées par le choc (3)	Superficies théoriquement affectées par le choc (rendements de référence 2009) (4)	Superficies théoriquement affectées par le choc (rendements 2009 simulés) (5)	Superficies déplacées à l'issue de la simulation (6)
	MT de biodiesel	MT d'huile	MT de graines	Mha	Mha	Mha
Colza	-0.830	-0.852	-2.047	-0.682	-0.687	-0.393
Soja	-0.655	-0.677	-3.580	-1.253	-1.255	-0.115
Palme	-0.377	-0.399	-1.754	-0.110	-0.110	-0.163
Tournesol	-0.042	-0.043	-0.101	-0.054	-0.054	-0.199
Coprah	-0.040	-0.043	-0.068	-0.111	-0.112	-0.124
Coton	-0.042	-0.042	-0.256	-0.106	-0.106	-0.011
Total	-1.986	-2.056	-7.807	-2.316	-2.324	-1.006
Autres cultures						0.563
CAS (effet net)						-0.443
	%	%	%	%	%	%
Colza	42%	41%	26%	29%	30%	39%
Soja	33%	33%	46%	54%	54%	11%
Palme	19%	19%	22%	5%	5%	16%
Tournesol	2%	2%	1%	2%	2%	20%
Coprah	2%	2%	1%	5%	5%	12%
Coton	2%	2%	3%	5%	5%	1%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%

- Colonne 1 : Transmission intégrale du choc de demande imprimé en France à l'offre de biodiesel au niveau mondial. Répartition du choc au prorata de la part des différentes huiles dans la production mondiale de biodiesel.

- Colonne 2 : Diminution théorique des quantités d'huiles utilisées en consommation intermédiaire pour produire le biodiesel.

- Colonne 3 : Diminution théorique des quantités de graines utilisées pour produire ces huiles (utilisation des coefficients techniques nationaux ou de ceux des principaux pays fournisseurs des matières premières concernées).

- Colonne 4 : Surfaces théoriques pour produire les graines impactées (utilisation des rendements nationaux ou des rendements des principaux pays fournisseurs des matières premières concernées, rendements observés de l'année de référence 2009).

- Colonne 5 : Effets rendements. Surfaces théoriques pour produire les graines impactées calculées en utilisant les rendements nationaux ou les rendements des principaux pays fournisseurs des matières premières concernées, rendements simulés pour 2009.

- Colonne 6 : Prise en compte de l'impact des ajustements des marchés et des effets de substitution. Surfaces déplacées à l'issue de la simulation du scénario BIODFR.

Source : Calculés à partir des résultats de simulation

Le Tableau 30 rapporte le même exercice que le Tableau 29 mais dans le cas du choc appliqué à la consommation française d'éthanol du scénario ETHFR. On y voit que la production mondiale d'éthanol affectée par le choc est composée à 47% d'éthanol de maïs (principalement d'origine américaine) et à 48% d'éthanol de canne à sucre (d'origine brésilienne), le reste étant couvert par l'éthanol de blé et de céréales diverses et par l'éthanol de betterave. Le choc de -0,556 million de tonnes appliqué à la consommation française d'éthanol équivaut donc, étant donné les rendements en énergie et les rendements à l'hectare des différentes matières premières, observés en 2009, à une réduction « théorique » de la surface cultivée au niveau mondial de -0,161 million d'hectares. La dernière

colonne du Tableau 30 indique que la réduction simulée est égale à -0,113 million d'hectares, un niveau relativement proche du niveau théorique. On observe dans le Tableau 30 que les réductions simulées des surfaces des diverses matières premières concernées sont également assez proches de leurs homologues théoriques. Cela signifie que le scénario ETHFR provoque assez peu d'effets de substitutions entre matières premières. L'essentiel de l'ajustement (60%) porte sur le maïs (qui génère 2,1 TEP par ha et 37% de coproduits utilisés en alimentation animale) et sur la canne à sucre (32%) (qui produit 2,83 TEP par hectare et, dans notre modèle, aucun coproduit pour l'alimentation animale).

Du fait de la forte présence de la canne à sucre dans le choc appliqué, le déficit en coproduits induit par le scénario ETHFR requière une faible production d'autres ingrédients pour les remplacer dans l'alimentation animale et, par suite, peu de surfaces supplémentaires qui viendraient compenser partiellement la réduction de surface initiale : +0,036 Mha d'autres cultures, ce qui est relativement faible par rapport aux surfaces supplémentaires en céréales dans le choc BIODFR qui viennent compenser la baisse de la réduction en surfaces en oléagineux.

Tableau 30 : Décomposition des effets du choc éthanol ETHFR

	Origine de l'éthanol affecté par le choc (1)	Origine des matières premières affectées par le choc (2)	Superficies théoriquement affectées par le choc (rendements de référence 2009) (3)	Superficies théoriquement affectées par le choc (rendements 2009 simulés) (4)	superficies déplacées à l'issue de la simulation (5)
	MT d'éthanol	MT de MP	Mha	Mha	Mha
Orge	0.000	0.000	0.000	0.000	+0.001
Blé	-0.024	-0.084	-0.022	-0.022	-0.008
Maïs	-0.260	-0.816	-0.083	-0.083	-0.068
Céréales divers	-0.002	-0.011	-0.004	-0.004	0.000
Betterave	-0.005	-0.067*	-0.001	-0.001	-0.002
Canne	-0.265	-4.104**	-0.051	-0.051	-0.036
Total	-0.556	-5.082	-0.161	-0.161	-0.113
Reste					+0.036
CAS (effet net)					-0.077
	%	%	%	%	%
Orge	0%	0%	0%	0%	-1%
Blé	4%	2%	14%	14%	7%
Maïs	47%	16%	52%	52%	60%
Céréales divers	0%	0%	2%	2%	0%
Betterave	1%	1%	1%	1%	2%
Canne	48%	81%	32%	32%	32%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

* Betterave humide utilisée et ** Canne humide

- Colonne 1 : Transmission intégrale du choc de demande imprimé en France à l'offre d'éthanol au niveau mondial. Répartition du choc au prorata de la part des différentes matières premières dans la production mondiale d'éthanol.

- Colonne 2 : Diminution théorique des quantités de matières utilisées en consommation intermédiaire pour produire l'éthanol.

- Colonne 3 : Surfaces théoriques pour produire les matières premières impactées (utilisation des rendements nationaux ou des rendements des principaux pays fournisseurs des matières premières concernées, rendements observés de l'année de référence 2009).

- Colonne 4 : Effets rendements. Surfaces théoriques pour produire les matières premières impactées calculées en utilisant les rendements nationaux ou les rendements des principaux pays fournisseurs des matières premières concernées, rendements simulés pour 2009.

- Colonne 6 : Prise en compte de l'impact des ajustements des marchés et des effets de substitution. Surfaces déplacées à l'issue de la simulation du scénario ETHFR.

Source : Calculés à partir des résultats de simulation

2. Analyse de sensibilité des résultats à certains paramètres du modèle

Des incertitudes sur certaines données et certains paramètres :

Les résultats présentés jusqu'ici reposent sur des données observées (cf., base de données décrite dans Forslund et al., 2013a) et un ensemble de paramètres (élasticités de substitution, de transformation et d'expansion, cf. Forslund et al., 2013b) que nous avons choisis étant donné l'information existante. Nous avons sélectionné les données qui nous semblaient présenter la meilleure qualité et la plus grande cohérence. Nous avons choisi les valeurs des paramètres qui nous semblaient les plus vraisemblables.

Les données quantitatives que nous utilisons concernent les volumes produits, transformés, consommés, stockés et échangés. Sur un exercice rétrospectif comme le nôtre, ces données sont relativement bien renseignées et accessibles. Elles peuvent être considérées comme fiables.

Les données concernant les prix sont plus incertaines. Si l'on trouve aisément des prix annuels internationaux pour les différents produits de grandes cultures considérés dans notre modèle, l'information sur ces mêmes prix à l'intérieur des différents pays et zones géographiques considérés est nettement plus rare. Comme indiqué dans Forslund et al. (2013a), nous calculons ces prix régionaux à partir des prix internationaux et d'informations quantitatives sur les politiques agricole et commerciale régionales (soutien à la production, subventions à l'exportation, barrières aux importations, etc.). Ces informations quantitatives sont toutefois assez mal renseignées pour certaines zones, ce qui est source d'incertitude pour certains de nos prix régionaux. De la même façon, notre modèle requière des données sur les prix de location des terres agricoles selon leur usage. La collecte de ces valeurs de fermage a fait l'objet d'un travail spécifique mais il faut souligner que l'information reste rare et que d'importantes incertitudes sur les niveaux de fermages représentatifs dans différentes régions du monde persistent.

Les paramètres du modèle résument les « possibilités » des technologies de production, les préférences des consommateurs et les comportements des agents (producteurs, consommateurs, détenteurs des facteurs de production). Le modélisateur dispose de très peu d'information sur la valeur de ces paramètres et dans tous modèles de marchés et d'échanges, ce sont ces paramètres qui sont la plus grande source d'incertitude. Usuellement, ces paramètres sont calibrés sur la base des valeurs que l'on rencontre dans la littérature existante et/ou « à dire d'experts ».

L'incertitude sur la valeur des paramètres étant grande, il est alors d'usage, dans les exercices de simulation, de tester la sensibilité des résultats à la valeur de ces paramètres. C'est ce que nous proposons ici. Après avoir présenté la nature et le choix des « fourchettes » de valeurs pour chaque paramètre, nous caractérisons dans un premier temps la sensibilité des résultats de simulation à chaque paramètre considéré isolément. Dans un second temps nous évaluons la sensibilité des résultats de simulation à l'ensemble des paramètres considérés simultanément en utilisant l'approche Monte Carlo. Ceci nous permet de construire un intervalle de confiance autour de nos résultats précédents en termes d'hectares déplacés à l'issue des scénarios BIODFR et ETHFR.

2.1. Sélection des valeurs des paramètres

Le Tableau 29 synthétise les paramètres sur lesquels porte notre analyse de sensibilité. Le choix des valeurs de références (REF) est explicité dans Forslund et al. (2013b) qui rapporte l'étape de calibrage du modèle MATSIM-LUCA. Les bornes inférieures (min) et supérieures (max) des valeurs de chaque paramètre sont choisies sur la base de notre expertise forgée notamment à partir de la littérature existante. L'interprétation de chaque paramètre et de son niveau est reprise lorsque nous interprétons les résultats de l'analyse de sensibilité. Retenons néanmoins dès à présent que :

- les valeurs basses (en valeur absolue) correspondent généralement à des horizons de plus court terme ou à des situations où les systèmes sont plus rigides et/ou contraints et qu'à l'inverse les valeurs hautes (en valeur absolue) correspondent à des horizons de plus long terme ou à des situations où les systèmes sont plus souples (facteurs facilement substituables ou très mobiles entre les secteurs de production, facteurs abondants, par exemple) ;
- les plages de variation de chaque paramètre, considérées dans notre analyse de sensibilité, sont significativement plus larges que celles usuellement retenues dans ce type d'exercice (souvent la valeur de référence multipliée et divisée par 2). Nous couvrons donc un large spectre de valeurs possibles.

Tableau 29 : Valeurs des paramètres de MATSIM-LUCA : valeurs de référence (REF) et plage de variation dans l'analyse de sensibilité

	Offre			Demande	
Elasticités d'expansion :					
	Expansion des terres grandes cultures	Expansion des autres facteurs et intrants de production agricoles	Expansion des autres facteurs et intrants des industries de transformation (trituration/biodiesel/éthanol/sucre)	Expansion de la demande humaine	Expansion de la demande animale
REF	0.1/0.2	0.5	1	-0.1	-0.2
min	0.05	0	0.1	-0.5	-0.5
max	0.5	2	3	0	0
Elasticités de substitution :					
	Substitution Terre vs. Autres facteurs et intrants				Substitution Céréales vs. Protéines
REF	0.5				0.3
min	0.1				0.05
max	0.95				0.95
Elasticités de mobilité :					
	Mobilité de la terre	Mobilité des autres facteurs et intrants de production agricoles	Mobilité des autres facteurs et intrants des industries de transformation (trituration/biodiesel/éthanol)		
REF	0.5	0.3	5/2.5/2.5		
min	0.15	1.1	REF /2		
max	3	3	REF X2		

2.2. Sensibilité des résultats à chaque paramètre considéré isolément

Nous rapportons et analysons les résultats en termes de surfaces déplacées au niveau mondial des scénarios BIODFR et ETHFR lorsque l'on fait varier successivement chaque paramètre considéré de sa valeur de référence à sa valeur minimale, puis à sa valeur maximale.

Le Tableau 30 permet de mesurer la sensibilité des résultats aux élasticités d'expansion de la terre et des autres facteurs et intrants de production. L'élasticité d'expansion des terres en grandes cultures est le paramètre qui influence le plus les résultats de simulation. Cette élasticité mesure la variation en pourcentage de la surface en grandes cultures lorsque le prix agrégé de ce type de terre augmente de 1%. L'élasticité d'expansion est par conséquent une mesure de la « facilité » avec laquelle des hectares cultivés hors grandes cultures peuvent « entrer » dans le secteur des grandes cultures. On devine intuitivement que le niveau de cette élasticité est lié, entre autres, à l'abondance ou à la rareté (le niveau de la compétition pour différents usages) des terres cultivables dans le pays ou la zone considérée ainsi qu'à l'hétérogénéité de la « qualité » de ces terres cultivables qui rend leur mise en exploitation en grandes cultures plus ou moins coûteuse. Dans la situation de référence, nous considérons une élasticité d'expansion de 0,1 pour l'ensemble des zones exceptés l'Afrique sub-

saharienne et le Brésil pour lesquels l'élasticité d'expansion est fixée à 0,2 pour figurer la plus grande abondance de terres cultivables dans ces régions. Lorsque l'élasticité d'expansion de la terre grandes cultures diminue, de sa valeur de référence à sa valeur minimale, cela signifie que la conversion de la terre entre l'usage grandes cultures et les autres usages devient plus difficile (ou dit autrement qu'il faut une plus grande augmentation du prix de la terre grandes cultures pour qu'un hectare entre en production de grandes cultures). Dans ce cas, l'ajustement de la surface totale en grandes cultures, consécutive aux chocs imprimés par les scénarios BIODFR et ETHFR, va être plus difficile. C'est ce qu'indique effectivement le Tableau 32 : dans la situation de référence, la surface totale déplacée à l'issue du scénario BIODFR (ETHFR) était de -443 000 hectares (-77 000 hectares) ; lorsque l'élasticité d'expansion de la terre grandes cultures est ramenée à 0,05, cette surface déplacée « tombe » à -220 000 hectares (-47 000 hectares). L'effet est évidemment inverse lorsque l'élasticité d'expansion de la terre grandes cultures est fixée à 0,5 : dans ce cas, la surface totale déplacée atteint -1,054 million d'hectares (-232 000 hectares) à l'issue du scénario BIODFR (ETHFR).

L'élasticité d'expansion des autres facteurs et intrants de production agricoles influence également significativement les résultats. L'interprétation de ce paramètre est la même que dans le cas de la terre : il mesure la « facilité » avec laquelle les autres facteurs (travail et capital) et intrants (engrais, pesticides, énergie, etc.) utilisés hors du secteur des grandes cultures peuvent « entrer » dans le secteur des grandes cultures. Là encore le niveau de cette élasticité est lié, entre autres, à l'abondance ou à la rareté (le niveau de la compétition pour différents usages) des autres facteurs et intrants dans le pays ou la zone considérée ainsi qu'à l'hétérogénéité de la « qualité » de ces facteurs et intrants qui rend leur mise en exploitation en grandes cultures plus ou moins coûteuse. Réduire la valeur de cette élasticité revient à considérer qu'il devient plus difficile de mobiliser les autres facteurs et intrants en provenance des autres secteurs de l'économie lorsque l'exploitation de ces autres facteurs et intrants en grandes cultures devient plus profitable. En d'autres termes les possibilités d'ajustement des autres facteurs et intrants, et donc des rendements à l'hectare, sont réduites. Il en résulte que suite aux chocs des scénarios BIODFR et ETHFR, les ajustements des rendements vont être plus difficiles et les surfaces à déplacer, pour ajuster les niveaux de production, seront plus importantes. C'est ce que l'on observe dans le Tableau 32 : lorsque l'élasticité d'expansion des autres facteurs et intrants de production agricoles est ramenée de sa valeur de référence (0,5) à 0, la surface totale déplacée à l'issue du scénario BIODFR (ETH) s'élève à -1,120 million d'hectare (-143 000 hectares).

L'élasticité d'expansion des autres facteurs et intrants des industries de transformation représente la capacité de ces industries à mobiliser du travail, du capital (usines) et des intrants variables lorsque l'exploitation de ces facteurs et intrants dans les secteurs de la trituration, de la fabrication de biocarburants et du sucre devient plus profitable. Le Tableau 32 montre que les résultats de simulation sont nettement moins sensibles à ce paramètre.

Tableau 30 : Sensibilité des résultats aux élasticités d'expansion du côté de l'offre

	Expansion des terres grandes cultures	Expansion des autres facteurs et intrants de production agricoles	Expansion des autres facteurs et intrants des industries de transformation (trituration/biodiesel/éthanol/sucre)
valeurs des paramètres :			
REF.	0.1/0.2	0.5	1
Min	0.05	0	0.1
Max	0.5	2	3
Surface déplacée suite au choc BIODFR (mha) :			
REF.	-443	-443	-443
Min	-220	-1120	-490
Max	-1054	-266	-424
Surface déplacée suite au choc ETHFR (mha) :			
REF.	-77	-77	-77
Min	-47	-143	-101
Max	-232	-61	-70

Dans le Tableau 31 nous analysons la sensibilité des résultats de simulation à l'élasticité de substitution entre la terre et les autres facteurs et intrants dans les technologies de production des

grandes cultures. Ce paramètre mesure le « degré de facilité » avec lequel le producteur agricole peut substituer la terre et les autres facteurs et intrants, tout en gardant le même niveau de production. En d'autres termes, l'élasticité de substitution mesure ici le « degré de facilité » avec lequel le producteur peut ajuster ses rendements lorsque les rapports de prix changent. Réduire cette élasticité implique qu'il devient plus difficile pour le producteur de substituer la terre et les autres facteurs et intrants, c'est-à-dire d'ajuster ses rendements. Le Tableau 33 montre bien en effet que lorsque l'élasticité de substitution diminue de sa valeur de référence (0,5) à 0,1, le scénario BIODFR (ETHFR) aboutit à une surface totale déplacée supérieure en valeur absolue (-732 000 hectares (-109 000 hectares)) du fait de la plus grande difficulté à ajuster les rendements. A l'inverse, la surface totale déplacée est fortement réduite en valeur absolue (-372 000 hectares (-68 000 hectares)) lorsque l'élasticité de substitution augmente, c'est-à-dire lorsque les possibilités d'ajustement des rendements à l'hectare sont accrues. Nos résultats de simulations sont donc également relativement sensibles à ce paramètre. Rappelons ici que Keeney et Hertel (2009) et Laborde (2011) choisissent des valeurs pour cette élasticité de substitution bien inférieures à notre valeur de référence et même à notre valeur minimale : respectivement 0,048 et 0,07. Si nous adoptions de telles valeurs, notre modèle conduirait à des déplacements de surfaces encore plus forts en valeur absolue que ceux que nous avons obtenus jusqu'à présent. S'il est clair que de faibles valeurs de l'élasticité de substitution peuvent être plausibles à court terme, elles nous paraissent moins pertinentes lorsque l'horizon temporel devient plus long (supérieur à une année), comme c'est le cas pour notre modèle. **Gohin (2013) souligne également cette forte sensibilité des résultats en termes de surface déplacée induite par le développement des biocarburants à l'élasticité de substitution entre la terre et les intrants variables. Il argumente en outre que les valeurs de cette élasticité utilisées par de nombreuses études sont faibles par rapport aux valeurs que l'on trouve dans la littérature, ce qui tend à surestimer la surface déplacée par le développement des biocarburants. Soulignons que la valeur de référence de l'élasticité de substitution que nous utilisons ici est proche de celle considérée comme plausible dans Gohin (2013).**

Tableau 31 : Sensibilité des résultats à l'élasticité de substitution terre/autres facteurs et intrants agricoles

	Substitution terre et autres facteurs et intrants
valeurs des paramètres :	
REF.	0.5
Min	0.1
Max	0.95
Surface déplacée suite au choc BIODFR (mha) :	
REF.	-443
Min	-732
Max	-372
Surface déplacée suite au choc ETHFR (mha) :	
REF.	-77
Min	-109
Max	-68

Le Tableau 32 rapporte les résultats de simulation des scénarios pour différentes valeurs des élasticités de transformation des fonctions CET (pour plus de détails, cf. Forslund et al., 2013b). Ces paramètres représentent le degré de mobilité des différents facteurs et intrants de production agricoles et des industries de transformation, à l'intérieur du secteur des grandes cultures pour les premiers et à l'intérieur des secteurs de la trituration et des secteurs de la fabrication de biodiesel et d'éthanol pour les seconds. Il apparaît que la valeur de ces paramètres a beaucoup moins d'impact sur les résultats de simulation que ceux analysés précédemment. De plus, les effets ne vont pas forcément dans le même sens selon le choc analysé. De fait, l'interprétation des effets de ces paramètres est moins évidente car les interactions sont plus complexes.

Une diminution de l'élasticité de transformation de la terre grandes cultures de 0,5 à 0,15 revient à considérer que cette terre est plus hétérogène et moins adaptable d'un usage grandes cultures à l'autre. Dans le cas du scénario BIODFR, la réduction de cette élasticité réduit la surface totale déplacée en valeur absolue (-382 000 hectares contre -443 000 hectare avec la valeur de référence).

Pour le scénario ETHFR en revanche, une valeur plus faible de cette élasticité entraîne une surface totale déplacée plus forte en valeur absolue (-78 000 hectares contre -77 000 hectares avec la valeur de référence). Les interprétations et les résultats sont similaires en ce qui concerne l'élasticité de transformation des autres facteurs et intrants agricoles et l'élasticité de transformation des facteurs et intrants des industries de transformation.

Tableau 32 : Sensibilité des résultats aux élasticités de transformation du côté de l'offre

	Transformation terre grandes cultures	Transformation autres facteurs et intrants de production agricoles	Transformation des facteurs et intrants des industries de transformation (trituration/biodiesel/ éthanol)
valeurs des paramètres :			
REF.	0.5	1.1	5/2.5/2.5
Min	0.15	0.3	2.5/1.25/1.25
Max	3	3	10/5/5
Surface déplacée suite au choc BIODFR (mha) :			
REF.	-443	-443	-443
Min	-382	-406	-446
Max	-508	-451	-431
Surface déplacée suite au choc ETHFR (mha) :			
REF.	-77	-77	-77
Min	-78	-87	-76
Max	-75	-71	-77

Nous nous intéressons désormais à la sensibilité des résultats de simulation aux paramètres du côté de la demande. Les Tableau 33 et 36 révèlent que nos résultats sont moins sensibles aux paramètres du côté de la demande qu'aux paramètres du côté de l'offre.

De manière très schématique, rappelons que le choc appliqué dans le scénario BIODFR par exemple est une réduction de la consommation française de biodiesel, qui se répercute sur la demande de matières premières à des fins énergétiques, qui induit une réduction de la production de ces différentes matières premières, qui entraîne une contraction initiale de leurs surfaces cultivées. A ce stade, le rôle de la demande animale et de la demande humaine va consister à amplifier ou à contrecarrer la contraction initiale des surfaces cultivées.

L'élasticité d'expansion de la demande humaine mesure la variation de la consommation humaine du panier huiles-céréales-sucre lorsque son prix agrégé varie de 1%. Cette élasticité est donc liée aux préférences et au comportement du consommateur, qui déterminent ses arbitrages entre ce panier huiles-céréales-sucre, le reste du panier alimentaire et ses autres postes de consommation. Une réduction (en valeur absolue) de la valeur de ce paramètre implique que la consommation du panier huiles-céréales-sucre va réagir moins fort à son prix. Ainsi lorsque l'élasticité d'expansion de la demande humaine passe de sa valeur de référence (-0,1) à 0, cela signifie que la consommation du panier huiles-céréales-sucre ne réagit plus à une variation de son prix agrégé. Dans le cas du scénario BIODFR, dont un des premiers effets est de réduire les prix des huiles, cela signifie que l'augmentation induite de la consommation humaine d'huiles va être atténuée et que l'effet de compensation entre demande énergétique et demande alimentaire sera moins fort que précédemment. Il en résulte que la surface totale déplacée s'accroît en valeur absolue (-570 000 hectares). Ce sont exactement les mêmes mécanismes (touchant les céréales et le sucre cette fois) qui conduisent à un résultat analogue dans le cas du scénario ETHFR (-87 000 hectares).

L'élasticité d'expansion de la demande animale mesure la variation de la consommation animale totale d'aliments concentrés lorsque le prix des aliments concentrés varie de 1%. Cette élasticité est donc liée aux technologies des secteurs de l'élevage et aux comportements des éleveurs, qui déterminent leurs arbitrages entre aliments concentrés et aliments fourragers et in fine, la réponse de la structure du cheptel national. Une réduction (en valeur absolue) de la valeur de ce paramètre implique que la consommation animale d'aliments concentrés va réagir moins fort au prix des aliments concentrés. Ainsi lorsque l'élasticité d'expansion de la demande animale passe de sa valeur de référence (-0,2) à 0, cela signifie que la consommation totale d'aliments concentrés ne réagit plus au prix. Dans le cas du scénario BIODFR, qui conduit à un ajustement à la hausse des prix des tourteaux, cela signifie que la réduction induite de la consommation animale va être atténuée et que

finalement la bonne tenue de cette demande va atténuer l'ajustement des surfaces cultivées. C'est ce que l'on observe dans le Tableau 35 : la surface totale déplacée (-345 000 hectares) est moindre en valeur absolue. Ce sont les mêmes mécanismes sur les coproduits qui sont à l'œuvre dans le scénario ETHFR. Mais ils sont contrecarrés par la baisse concomitante des prix des céréales. Si bien que les effets sont beaucoup moins nets.

Tableau 33 : Sensibilité des résultats aux élasticités d'expansion du côté de la demande

	Expansion de la demande humaine	Expansion de la demande animale
valeurs des paramètres :		
REF.	-0.1	-0.2
Min	0	0
Max	-0.5	-0.5
Surface déplacée suite au choc BIODFR (mha) :		
REF.	-443	-443
Min	-570	-345
Max	-215	-520
Surface déplacée suite au choc ETHFR (mha) :		
REF.	-77	-77
Min	-87	-77
Max	-55	-76

Le Tableau 34 rapporte finalement la sensibilité de nos résultats aux possibilités de substitutions entre les céréales et l'agrégat des matières protéiques (tourteaux et coproduits) au sein des aliments concentrés. Cette élasticité est donc liée à la technologie de production des aliments concentrés et, dans notre cas qui ne différencie pas les aliments par type d'animaux, à la composition et à l'évolution de la structure du cheptel national. Diminuer l'élasticité de substitution de 0,3 à 0,05 revient à rendre plus difficile la substitution entre céréales et ingrédients protéiques dans les aliments concentrés. Dans le cas du scénario BIODFR, l'augmentation du prix des tourteaux tend à rendre les céréales relativement plus avantageuses et à augmenter leur consommation dans les rations animales. Cette bonne tenue de la demande animale de céréales contribue à soutenir leurs prix et leurs superficies cultivées. Il en résulte que la baisse des superficies en oléagineux provoquée par le choc BIODFR est, en partie, compensée par une augmentation de la superficie en céréales. Cet effet de compensation est moins fort lorsque l'on diminue les possibilités de substitution au sein des aliments concentrés. Ainsi, le Tableau 36 montre qu'une élasticité de substitution plus faible conduit à une surface déplacée totale plus importante : -570 000 hectares contre -443 000 hectares. Dans le cas du scénario ETHFR la baisse des prix des céréales et la hausse des prix des coproduits de la fabrication d'éthanol rend les céréales plus attractives relativement aux tourteaux et aux coproduits dans les rations animales. La consommation animale de céréales s'accroît par conséquent, ce qui tend à contrecarrer la baisse initiale de leurs prix. et tend à augmenter leur consommation dans les rations aux dépens des tourteaux et de coproduits. La réduction initiale des superficies cultivées en céréales est donc atténuée par la bonne tenue de la demande céréalière en alimentation animale. La diminution de l'élasticité de substitution entre céréales et ingrédients protéiques limite le recours accru aux céréales dans les rations et donc l'effet positif de la bonne tenue de la demande animale sur les superficies cultivées en céréales. La surface totale déplacée est donc plus importante -81 000 hectares contre -77 000 hectares.

Tableau 34 : Sensibilité des résultats aux élasticités de substitution du côté de la demande

	Substitution céréales et ingrédients protéines
valeurs des paramètres :	
REF.	0.3
Min	0.05
Max	0.95
Surface déplacée suite au choc BIODFR (mha) :	
REF.	-443
Min	-477
Max	-404
Surface déplacée suite au choc ETHFR (mha) :	
REF.	-77
Min	-81
Max	-72

Au total, cette première étape de l'analyse de sensibilité montre clairement que nos résultats de simulations sont très sensibles à certains paramètres du modèle. Parmi ceux-ci, ce sont les paramètres liés à l'offre qui influencent le plus fortement les résultats. Comme on pouvait le pressentir, l'élasticité d'expansion des terres grandes cultures et l'élasticité d'expansion des autres facteurs et intrants de production agricoles influent considérablement sur nos résultats en termes de surfaces déplacées induites par nos scénarios. Selon la valeur que l'on donne à chacun de ces paramètres, la surface totale déplacée au niveau mondial à l'issue du scénario BIODFR (ETHFR) varie de -250 000 (-50 000) hectares environ à plus de -1 million d'hectares (-25 000 hectares environ). Ce résultat n'est pas très étonnant dans la mesure où ces deux paramètres vont « dicter » les possibilités d'ajustement des surfaces cultivées et des rendements des grandes cultures, suite aux chocs appliqués dans les scénarios. Or des possibilités importantes d'ajustement de la surface en grandes cultures tendent à accroître les surfaces déplacées tandis que des possibilités importantes d'ajustement des rendements tendent à limiter ces surfaces déplacées.

C'est également à ce niveau des ajustements surfaces cultivées vs. rendements que joue l'élasticité de substitution entre terre et autres facteurs et intrants dans les secteurs de production des grandes cultures. Nos résultats de simulations sont également sensibles à ce paramètre, la surface totale déplacée au niveau mondial suite au scénario BIODFR (ETHFR) pouvant varier, selon la valeur de l'élasticité de substitution, de -350 000 (-70 000) hectares à plus de 700 000 (-100 000) hectares. A cet égard, Gohin (2013) soulève la question des valeurs très faibles des élasticités de substitution utilisées actuellement dans les travaux existants qui quantifient les effets CAS.

Enfin, un point intéressant à noter est que nos résultats sont plus sensibles aux paramètres liés à la demande humaine qu'aux paramètres relevant de la demande animale.

2.3. Simulation Monte Carlo

L'approche Monte Carlo consiste à simuler un grand nombre de fois un scénario en utilisant à chaque fois un jeu de paramètres tiré au hasard. Chaque paramètre variant sur un intervalle de valeurs en fonction d'une certaine distribution de probabilité, il est alors possible, à partir d'un nombre suffisant de simulations, de construire un intervalle de confiance autour des résultats.

C'est cette approche que nous proposons ici. Nous considérons l'ensemble des élasticités précédentes et conservons les « fourchettes » de valeurs préalablement établies (cf. Tableau 30). Ne disposant pas d'information a priori sur la distribution de probabilité de chacune de ces élasticités, nous adoptons des lois de distribution uniforme¹². Le scénario BIODFR et le scénario ETHFR sont alors simulés 10 000 fois et leurs résultats stockés. A l'issue de cette étape, nous pouvons calculer un

¹² La distribution peut être obtenue dans Excel à l'aide de la fonction ALEA, par exemple =ALEA()*(0.95-0.05)+0.05 pour distribuer aléatoirement la variable entre .05 et 0.95

intervalle de confiance autour de notre variable d'intérêt : la surface totale déplacée au niveau mondial.

Les

Figure 34 et 35 présentent les distributions de la surface totale déplacée au niveau mondial à l'issue des scénarios BIODFR et ETHFR respectivement. Quel que soit le scénario, ces distributions sont très « étalées », ce qui confirme la grande sensibilité de nos résultats aux paramètres du modèle. Par exemple, dans le cas du scénario BIODFR, la surface totale déplacée peut varier, selon le jeu de paramètres, entre -28 000 et -2,7 millions d'hectares. Ces valeurs extrêmes sont toutefois très peu fréquentes et l'intérêt de l'approche Monte Carlo est de pouvoir resserrer l'analyse sur les valeurs les plus fréquentes des résultats. Ainsi, si l'on se limite aux valeurs des résultats dont la probabilité d'occurrence est supérieure à 50%, alors la surface totale déplacée varie entre -384 000 et -753 000 hectares. En moyenne, la surface déplacée s'établit à - 589 000 hectares. La médiane (c'est-à-dire la valeur qui sépare les résultats en deux groupes de probabilité d'occurrence égale) s'établit quant à elle à -561 000 hectares. La fourchette des résultats les plus fréquents contient bien sûr le résultat obtenu avec les valeurs de référence des élasticités, -443 000 hectares, mais on voit que ce dernier se situe plutôt dans la partie basse de la fourchette. Notre résultat de référence est d'ailleurs inférieur (en valeur absolue) à la moyenne et à la médiane de la distribution.

En ce qui concerne le scénario ETHFR, la surface totale déplacée au niveau mondial se situe, avec une probabilité supérieure à 50%, entre -69 000 et -120 000 hectares. Elle est en moyenne égale à -96 000 hectares et sa médiane s'établit aussi à -96 000 hectares. Le résultat obtenu avec les valeurs de référence des élasticités, -77 000 hectares, se situe aussi dans la partie basse de la fourchette des résultats les plus probables.

Figure 34: Distribution de la surface totale déplacée au niveau mondial induite par le scénario BIODFR (verticale rouge = Résultat de référence)

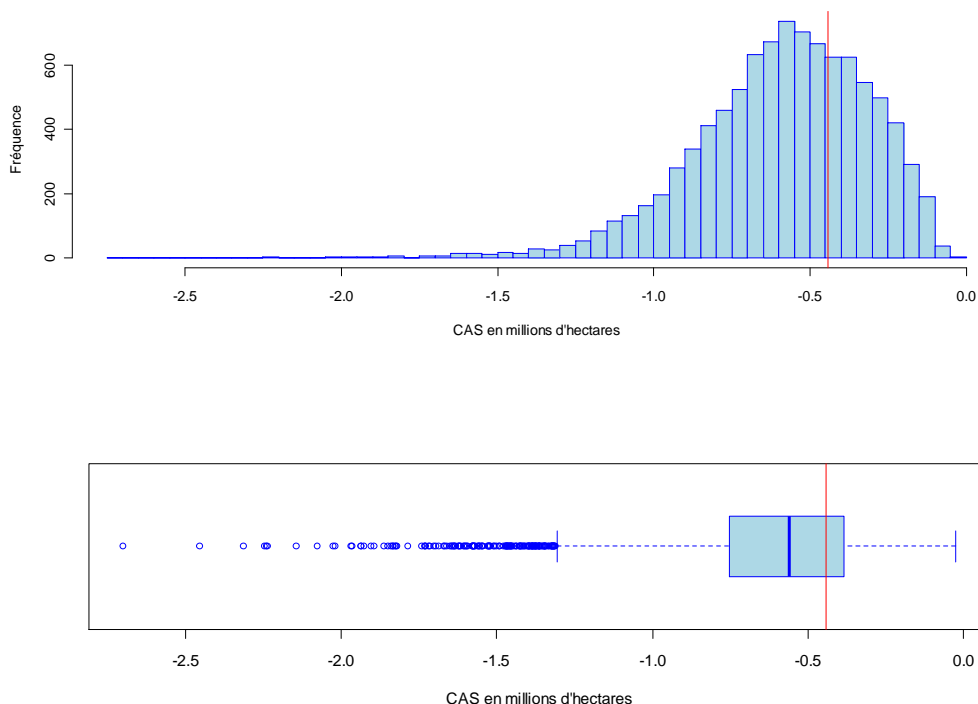
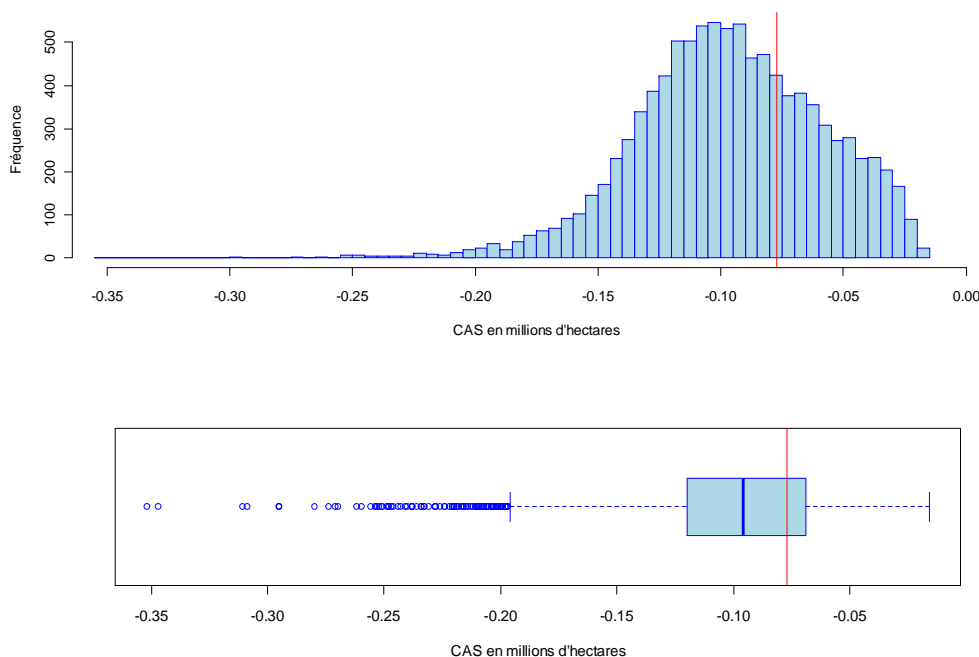


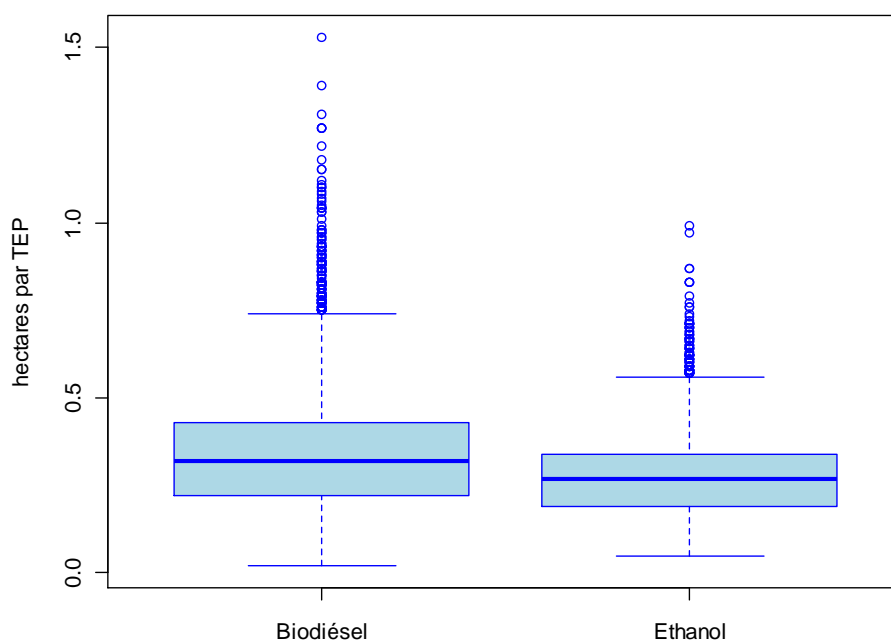
Figure 35 : Distribution de la surface totale déplacée au niveau mondial induite par le scénario ETHFR (verticale rouge = Résultat de référence)



L'ensemble des résultats ci-dessus peut également être exprimé en termes d'hectares déplacés par unité d'énergie. C'est ce que propose la Figure 36 qui compare le nombre d'hectares déplacés par unité d'énergie du choc appliqué, exprimé en tonnes équivalent pétrole, pour les 2 scénarios BIODFR et ETHFR.

On retrouve bien évidemment la large plage de variation des résultats que suggéraient les Figures 34 et 35, puisque la Figure 36 reprend les surfaces totales déplacées des figures précédentes et les divise par la taille du choc respectif exprimé en tonnes équivalent pétrole. Ainsi, en limitant l'analyse aux résultats les plus probables (i.e., dont la probabilité d'occurrence est supérieure à 50%), le changement d'affectation des sols (CAS) induit par le biodiesel peut varier, selon le jeu de paramètres du modèle, de 0,22 ha/TEP à 0,43 ha/TEP, la valeur moyenne s'établissant à 0,33 ha/TEP et la médiane à 0,32 ha/TEP. La fourchette des résultats les plus fréquents contient bien sûr le résultat obtenu avec les valeurs de référence des élasticités, 0,25 ha/TEP, mais on constate là encore que ce dernier se situe plutôt dans la partie basse de la fourchette. Le CAS induit par l'éthanol est légèrement inférieur : il peut varier, selon le jeu de paramètres du modèle, de 0,19 ha/TEP à 0,34 ha/TEP, s'établissant en moyenne à 0,27 ha/TEP, qui correspond aussi à la valeur de la médiane. Notre résultat correspondant aux valeurs de référence des élasticités, 0,22 ha/TEP, est aussi dans la partie basse de la fourchette.

Figure 36 : Surface déplacée au niveau mondial par la consommation/production d'une tonne équivalent pétrole de biodiesel ou d'éthanol en France



3. Analyse des résultats en termes d'émissions de gaz à effet de serre (facteur CAS)

La dernière étape de l'analyse est la détermination du « facteur CAS » qui attribue au biocarburant considéré un facteur d'émissions de gaz à effet de serre liées aux changements d'affectation des sols dont il est à l'origine. Le facteur CAS est exprimé en gCO₂/MJ et est calculé de la manière suivante :

$$\text{Facteur CAS} = \frac{\text{Surfaces déplacées} \times \text{Facteur moyen d'émission}}{\text{Taille du choc} \times \text{durée d'amortissement}}$$

La quasi-totalité des études existantes présentent leurs résultats en termes de facteur CAS et il est intéressant de présenter nos propres résultats sous cette forme afin de les comparer à l'ensemble des résultats disponibles dans le débat actuel.

Il faut néanmoins préciser à ce stade que notre modèle n'est pas adapté pour ce type de calcul et que nos résultats en termes de facteur CAS sont fragiles car ils reposent sur des hypothèses fortes, même si elles sont communément utilisées dans les études existantes :

Pour chaque simulation en effet, le modèle MATSIM-LUCA fournit, par pays/zone, la variation de surface cultivée de chaque grande culture considérée. Mais le modèle n'étant pas spatialisé et ne considérant qu'une partie de l'ensemble des surfaces disponibles dans chaque pays/zone, il ne fournit aucune information sur l'usage antérieur ou l'usage postérieur des hectares qui sont entrés, respectivement sortis, de la surface cultivée de chaque grande culture. Or c'est ce changement d'usage qui est potentiellement responsable d'émissions de gaz à effet de serre (GES). En considérant que les transferts de surfaces cultivées entre grandes cultures n'émettent pas de GES, on peut raisonner en termes de déplacements nets de surfaces (i.e., considérer la somme des variations des surfaces cultivées des différentes grandes cultures considérées dans chaque pays/zone). Ces derniers mesurent en effet, pour chaque pays/zone, le nombre d'hectares qui sont « entrés ou sortis » des surfaces cultivées en grandes cultures. Par définition, ces hectares étaient auparavant utilisés ou seront dorénavant utilisés pour un autre usage que la production des grandes cultures considérées dans le modèle. Ces usages potentiels sont nombreux : autres cultures (telles que autres cultures

industrielles, pommes de terres, légumes, cultures fourragères, vergers, jachères, etc.), prairies, sols boisés, sols artificialisés et autres sols (friches, landes, haies, etc.), selon la nomenclature TERRUTI telle que fournie dans Chakir et Vermont (2013) par exemple ; ou autres cultures, prairies tempérées, savanes tropicales, déserts et semi-déserts, toundra, tourbières, forêts, selon la classification du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, voir par exemple IPCC, 2000).

Pour calculer le facteur CAS, nous devons donc poser des hypothèses, par pays/zone :

- sur l'usage antérieur (postérieur) des hectares qui sont entrés (sortis) de la surface totale cultivée en grandes cultures considérées dans le modèle : ces hypothèses sont forcément simplistes ;
- sur les coefficients d'émission/stockage de carbone par type d'usage. Nous retenons pour ce faire, les coefficients usuellement utilisés dans la littérature.

Etant donné l'ensemble de ces hypothèses, nous recommandons au lecteur de rester extrêmement prudent quant aux résultats présentés ci-dessous.

Nos simulations nous donnent pour chaque pays/zone, le CAS, c'est-à-dire pour nos scénarios, le nombre d'hectares qui « sort » de la surface cultivée en grandes cultures considérées divisé par la taille du choc exprimé en TEP ou, ici, en mégajoules (MJ). Pour calculer le facteur CAS il nous faut donc :

- Poser une hypothèse sur la durée d'amortissement : elle est généralement fixée à 20 ou 30 années selon les études (De Cara et al., 2012).
- Déterminer le facteur moyen d'émissions : ceci implique, pour chaque pays/zone, de poser des hypothèses sur l'usage postérieur des hectares qui sont sortis de la surface cultivée en grandes cultures considérées dans le modèle et d'associer à chacun des usages possibles un coefficient d'émissions. Pour ce qui est des coefficients d'émissions, nous utilisons ceux, par pays/zone, du modèle GTAP repris dans Edwards et al. (2010) p. 99 (voir Annexe A). En ce qui concerne le « nouvel usage des hectares libérés », nous sommes forcés d'adopter des hypothèses très fortes. Nous ne retenons que deux usages alternatifs possibles : prairies et forêt ; nous supposons le même schéma de conversion des hectares libérés dans tous les pays/zones (par exemple, 100% des hectares libérés convertis en prairies ou 75% des hectares libérés convertis en prairies et 25% convertis en forêt) ; nous considérons différents schéma de conversion alternatifs.

Utiliser des coefficients d'émissions et poser des hypothèses sur le type d'usage antérieur/postérieur des hectares qui entrent/sortent des surfaces cultivées considérées dans les modèles de simulation est une pratique courante et nous ne faisons ici qu'adopter cette pratique. Soulignons toutefois que certains modèles, qui considèrent non pas uniquement les surfaces en grandes cultures mais l'ensemble des surfaces agricoles, y compris les prairies, sont tout de même mieux armés que le modèle MATSIM-LUCA. De tels modèles en effet (comme GTAP ou Mirage par exemple) n'ont à faire d'hypothèses que sur l'usage antérieur/postérieur des hectares qui entrent/sortent des surfaces agricoles, la conversion cultures/prairies étant endogène au modèle.

Le Tableau 37 ci-dessous rapporte les facteurs CAS, c'est-à-dire les émissions de GES liées au changement d'affectation des sols induit par le développement du biodiesel, de l'éthanol et de l'ensemble biocarburants en France entre 2004 et 2009, calculés pour différents schéma de conversion : 100% prairies ; 75% prairies-25% forêts ; 50% prairies-50% forêts.

Tableau 37 : Estimation des facteurs CAS obtenus dans les différents scénarios simulés sous différentes hypothèses de conversion cultures/prairies et forêt (gCO2/MJ)

	Biodiesel	Ethanol	Biocarburants
Conversion 100% prairies	35,5	25,4	33,7
Conversion 75% prairies	59,7	47,5	57,4
Conversion 50% prairies	83,8	69,7	81,0

Pour une durée d'amortissement de 20 ans

Source : Calculés à partir des résultats de simulations

Enfin, la

Figure 37 rapporte les résultats de l'analyse de sensibilité précédente en termes de facteur CAS pour les scénarios BIODFR et ETHFR, sous l'hypothèse d'un schéma de conversion 75% prairies et 25% forêt. La fourchette des résultats les plus probables (au moins 50% de probabilité d'occurrence) s'établit à 58-104 gCO₂eq/MJ pour le biodiesel et 62-108 gCO₂eq/MJ pour l'éthanol. La valeur moyenne est de 83 gCO₂eq/MJ pour le biodiesel et 87 gCO₂eq/MJ pour l'éthanol. La médiane s'établit à 78 gCO₂eq/MJ pour le biodiesel et 87 gCO₂eq/MJ pour l'éthanol.

L'analyse de sensibilité fait donc ressortir, en moyenne, un léger désavantage en termes d'émissions de GES à l'éthanol par rapport au biodiesel, ce que ne laissaient pas présager les résultats précédents. Ce résultat inattendu provient du fait que les différents jeux de paramètres impliquent des surfaces nettes déplacées plus ou moins importantes dans les différentes régions. Or, comme l'indique l'Annexe A et le Tableau 38, les coefficients d'émissions varient d'une région à l'autre.

Soulignons pour finir, qu'étant donné la fragilité de nos résultats en termes de facteurs CAS, on peut sans doute considérer que l'écart constaté à l'issue de l'analyse de sensibilité entre biodiesel et éthanol n'est pas significatif.

Figure 37 : Facteur CAS pour le biodiesel et l'éthanol (hypothèse de conversion : 75% prairies/25% forêts)

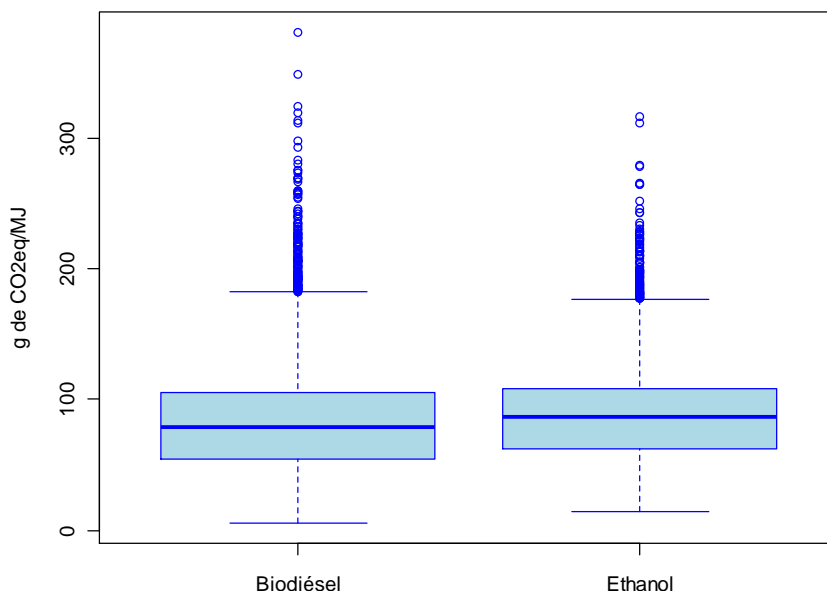


Tableau 35 : Détail des valeurs moyennes obtenues à l'issue de la simulation Monte Carlo avec distinction des zones où se produisent les CAS

	BIODFR	ETHFR	
Valeurs moyennes			Coefficients moyens d'émissions (T de CO2eq/ha)
CAS (million d'ha)	-0.590	-0.096	
Régions d'origine des CAS :			
USA	8.4%	15.7%	269.5
CANADA	7.4%	1.5%	323.3
BRESIL	8.4%	25.3%	151.0
ARG	6.1%	1.5%	151.0
ASI_SE	-2.1%	3.2%	298.0
ASI_SUD	0.0%	0.0%	290.5
CHINE	15.2%	8.3%	290.5
AFR_SUB	7.7%	10.8%	108.5
ASI_EST	0.6%	0.3%	207.3
AFR_NOR	0.9%	1.3%	99.5
THAI	1.6%	0.9%	298.0
AUS	4.4%	2.2%	170.5
MEX	0.7%	2.5%	151.0
EX_URSS	15.7%	10.7%	194.8
FR	3.2%	1.4%	191.3
UE hors FR	8.8%	6.1%	191.3
AUTRES	13.0%	8.1%	183.2
CAS par unité d'énergie produite (ha/TEP)	-0.33	-0.27	
Emissions globales en (millions de T de CO2eq)	-122.3	-25.9	
Facteur CAS en g de CO2eq/MJ	-82.6	-86.6	

Chapitre IV. Complémentarité avec les autres études menées dans le même cadre et quelques perspectives pour des travaux futurs

La présente étude est la quatrième d'une série d'études engagées conjointement par l'ADEME et l'INRA et qui portent sur l'analyse du changement d'affectation des sols lié au développement des biocarburants. Ce chapitre vise à préciser comment la présente étude complète les 3 autres et comment elle peut être poursuivie dans le futur.

1. Revue critique des études évaluant l'effet des CAS sur les bilans environnementaux des biocarburants (De Cara et al., 2012)

La revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants (De Cara et al., 2012) a été conduite pour faire le point sur les travaux et les données actuellement accessibles afin d'améliorer les connaissances et apporter des réponses sur le changement d'affectation des sols (CAS), ses conséquences sur les variations de stocks de C et les émissions de GES.

Ainsi, De Cara et al. ont collecté un certain nombre d'évaluations de facteurs CAS (indicateur des émissions annualisées liées au CAS par unité d'énergie offerte par les biocarburants) provenant de différentes études disponibles dans la littérature. Nous pouvons comparer les facteurs CAS issus de l'étude de De Cara et al. avec les nôtres qui sont obtenus (pour rappel) en faisant des hypothèses fortes et simplistes sur la provenance des terres (forêt ou prairies) entrant dans le secteur des grandes cultures du fait du développement des biocarburants français entre 2004.

De Cara et al. aboutissent à un facteur CAS moyen sur l'ensemble des références collectées (561) de 71,28 gCO₂eq/MJ, la médiane étant à 48,45 gCO₂eq/MJ. Notre résultat (57,4 gCO₂eq/MJ, tous biocarburants confondus, cf. Tableau 37) et les valeurs moyennes de notre analyse de sensibilité (83 gCO₂eq/MJ pour le biodiesel et 87 gCO₂eq/MJ pour l'éthanol) sont donc assez proches de la moyenne calculée par De Cara et al. Par ailleurs, De Cara et al. soulignent la forte variabilité des évaluations des facteurs CAS disponibles dans la littérature (écart-type : 165,34 gCO₂eq/MJ). Cette variabilité traduit en partie la diversité prévalant dans les approches, les définitions et les hypothèses adoptées dans les études et en particulier dans les modèles qui sous-tendent ces études. Notre analyse de sensibilité, qui montre que nos résultats sont très sensibles aux valeurs des élasticités retenues dans le modèle, illustre également cette forte variabilité des résultats : notre étude, que nous avons souhaitée très transparente, quant aux données et hypothèses du modèle MATSIM-LUCA et à la sensibilité des résultats à certains paramètres, montre clairement que le changement d'un paramètre-clé du modèle peut conduire à des résultats sensiblement différents en termes de changement d'affectation des sols.

Nous pouvons également comparer nos résultats aux prédictions du méta-modèle construit par De Cara et al., sur la base des hypothèses considérées dans Laborde (2011)¹³. Ces prédictions conduisent à une valeur moyenne du facteur CAS de 72 gCO₂eq/MJ pour les modèles économiques (comparé à 60 gCO₂eq/MJ pour les Analyses de Cycle de Vie conséquentielles). En tenant compte d'un effet fixe « modèle », les prédictions du facteur CAS s'étalent de 42 à 107 gCO₂eq/MJ. Cette fourchette n'est pas très éloignée de celles que nous calculons pour le biodiesel et l'éthanol à l'issue de notre analyse de sensibilité : respectivement, 58-104 gCO₂eq/MJ pour le biodiesel et 62-108 gCO₂eq/MJ pour l'éthanol.

¹³ Ces hypothèses peuvent être résumées ainsi : le scénario examine un mandat européen composé à 35% d'éthanol et 65% de biodiesel uniquement fondé sur des procédés de 1^{ère} génération ; les biocarburants peuvent être produits dans toutes les régions du monde ; l'effet tourbière est pris en compte et les conversions de terres en prairies, forêts ou terres marginales sont autorisées ; les effets rendements, demande et coproduits sont modélisés de manière endogène.

2. Analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les CAS (InNuméri, 2012)

L'étude conduite par InNuméri (InNuméri, 2012) avait pour objet d'analyser les interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les changements d'affectation des sols à partir de données et de statistiques observées.

Cependant, les marchés de grandes cultures et les surfaces agricoles sont influencés par de nombreux autres facteurs que le développement des biocarburants en France (aléas climatiques et mauvaises récoltes de par le monde, évolution des régimes alimentaires et de la demande humaine, évolution des cheptels animaux et de la demande animale, changements de politiques agricole et environnementale, crise économique, etc.). Les données et statistiques observées sont le résultat des effets de tous ces facteurs et il n'est pas possible d'y distinguer les effets du seul développement des biocarburants en France. En d'autres termes, même si des corrélations peuvent être observées entre l'évolution des marchés français et mondiaux des grandes cultures et le développement des biocarburants en France, il n'y a pas nécessairement relation de causalité. Ainsi, pour isoler les effets sur les marchés et en termes de CAS induits par le développement des biocarburants en France, il est nécessaire de recourir à des modèles et de comparer les résultats de simulations de scénarios contrefactuels « avec et sans développement des biocarburants », comme nous le faisons dans la présente étude. Nous tentons de comparer tout de même certains résultats issus de notre étude et de celle d'InNumeri.

InNuméri calcule les superficies mobilisées en France et à l'étranger pour la production de biocarburants en France ainsi que les surfaces mobilisées pour la production de biocarburants importés en France. La première différence est donc qu'InNuméri estime les CAS liés à la production de biocarburants, tandis que notre analyse estime les CAS induits par la consommation de biocarburants en France qui, à travers l'impact sur les prix, affecte la production de biocarburants et l'utilisation des matières premières qui en découle.

En France, comme InNuméri, nous trouvons que l'essentiel des changements d'affectation des sols dus au développement des biocarburants a lieu à l'intérieur de la surface totale en grandes cultures et consiste en des conversions d'une culture à l'autre. Notre analyse évalue la surface déplacée en France du fait de la progression de la consommation française de biocarburants entre 2004 et 2009 à seulement 13 000 ha, avec des transferts entre grandes cultures de l'ordre de 31 000 ha (baisse des surfaces oléagineuses en partie compensée par des surfaces en céréales et en pois). InNuméri évalue que 90% des changements d'affectation des sols dus aux biocarburants auraient été constitués par le retour en grandes cultures de terres au préalable en jachère (90 000 ha sur 100 000 ha entre 1989 et 2009) et que l'essentiel de ces conversions aurait eu lieu à partir de 2004, soit environ 60 000 ha pris sur les jachères entre 2004 et 2009.

A l'étranger, pour le biodiesel, InNuméri évalue les surfaces déplacées à partir des importations d'huiles utilisées pour la production de biodiesel en France converties en surfaces dans les pays exportateurs d'une part, et une analyse de corrélation avec l'évolution d'autres types de surfaces dans ces pays. Il s'agit des importations de palme (huile), de soja (huile) et de colza (huile et graines). La fourchette d'estimation du changement d'affectation des sols dû au palme est comprise entre 15 000 et 40 000 ha. Pour ce qui concerne le soja, il s'agit au maximum de 380 000 ha. Pour le colza, InNuméri ne considère aucun CAS lié au biodiesel en France. Il s'agit donc au total d'un peu plus de 420 000 ha de surfaces en oléagineux qui seraient déplacées due à la production de biodiesel en France. A ces 420 000 ha s'ajouteraient, selon InNumeri, entre 20 000 et 60 000 ha liés aux importations française de biodiesel et 30 000 ha liés à la baisse des exportations françaises des matières premières agricoles que d'autres pays doivent produire pour satisfaire la demande mondiale.

Pour l'éthanol, l'InNuméri fait l'hypothèse qu'aucun changement d'affectation des sols n'a lieu à l'étranger, car la France produit de l'éthanol à partir de matières premières produites sur le sol domestique.

Tableau 39 : Comparaison des résultats InNuméri avec ceux de MATSIM-LUCA pour les surfaces déplacées à l'étranger dues au biodiesel en France (en 1000 ha)

	InNumeri	Matsim LUCA
CAS direct lié aux importations d'huiles	175 – 420	
<i>dont Palme</i>	15 - 40	
<i>dont soja</i>	160 - 380	
CAS direct lié aux importations de biodiésel	20-60	
CAS indirect	30	
CAS total	225 – 510	431*

*Les surfaces déplacées en France (12 000 ha) ont été soustraites du résultat global du choc BIODFR

Notre analyse évalue à 443 000 ha déplacés au total au niveau mondial du fait de l'augmentation de la consommation française de biodiesel entre 2004 et 2009, 77 000 ha déplacés au niveau mondial du fait de l'augmentation de la consommation française d'éthanol, soit au total 517 000 ha déplacés du fait de l'augmentation de la consommation française de biocarburants sur la période 2004-2009. En soustrayant les surfaces déplacées en France dans notre scénario BIODFR (soit 12 000 ha), nos résultats conduisent à 431 000 ha déplacées à l'étranger, à comparer à l'étude d'InNuméri qui conduit à une estimation entre 225 et 510 000 ha. Les résultats sont donc comparables entre les deux études pour le biodiesel, mais moins pour l'éthanol.

InNuméri trouve des changements d'affectation des sols plus importants pour les oléagineux, car il ne comptabilise pas les possibles gains de surfaces que représente la production de tourteaux, coproduits des huiles utilisées dans la production de biodiesel. InNuméri estime néanmoins que l'économie en termes de surface liée à la réduction de la demande française de tourteaux pourrait être de l'ordre de 480 000 ha. De plus, InNuméri conduit son analyse à partir des importations françaises d'huiles et de graines mais ne considère pas les échanges des exportateurs de ces huiles avec d'autres pays. Ainsi, une augmentation des importations d'huiles de la France peut être compensée par une diminution des importations d'un autre pays, auquel cas l'augmentation des importations françaises n'a pas forcément d'impact au niveau des surfaces. De plus, et de manière générale, l'analyse d'InNuméri est basée sur des corrélations observées avec d'autres types de surfaces, tout en sachant que les évolutions de ces dernières ne sont pas forcément liées aux seuls biocarburants.

Notre analyse, à l'aide d'un modèle, permet de prendre en compte ces phénomènes qui se produisent de manière simultanée au travers des variations de prix. Aussi pour l'éthanol, tandis qu'InNuméri ignore les CAS à l'étranger dus à la production d'éthanol en France notre modèle permet de prendre en compte l'impact sur les surfaces dans les autres pays au travers des variations de prix de matières premières agricoles que la demande française d'éthanol a pu engendrer sur la période.

3. Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les CAS (Chakir et Vermont, 2013)

L'objectif de l'étude de Chakir et Vermont est d'analyser l'évolution des usages des sols, des changements d'allocation des sols et des émissions de gaz à effet de serre engendrés par le développement des biocarburants en France sur la période 1992-2010, en construisant des matrices de transitions entre les différents usages des sols entre deux années successives. Les cultures considérées sont le colza, le tournesol, le blé et la betterave. Tout comme l'étude réalisée par InNuméri, l'analyse de Chakir et Vermont est conduite sur des statistiques, des données observées, qui ne permettent pas de rendre compte du seul impact du développement des biocarburants. En outre, ces données ne permettent pas non plus de distinguer les surfaces utilisées pour les cultures énergétiques. Notre apport par rapport à cette analyse est donc, encore une fois, l'utilisation d'un modèle pour pouvoir comparer les résultats de simulations de scénarios « avec et sans développement des biocarburants » toutes choses égales par ailleurs.

Chakir et Vermont ne distinguant pas les surfaces allant vers les cultures énergétiques, la comparaison directe des résultats des deux études n'est pas possible. Chakir et Vermont observent les transferts de surfaces entre les cultures, à destination alimentaire et énergétique confondues, et les transferts de surfaces entre usages agricoles et non agricoles. Ainsi, et considérant les flux nets des usages non agricoles (sols boisés, sols naturels et sols artificialisés) vers les quatre cultures considérées, ceux-ci s'élèvent chaque année à -6 200 ha. Les flux nets provenant des usages agricoles (autres terres arables, surfaces toujours en herbe et jachères) vers les quatre cultures considérées s'élèvent à +67 500 ha par an, soit un total de +61 300 ha par an pour les flux de surfaces agricoles et non agricoles allant vers les 4 cultures qui peuvent ensuite être utilisées à la fois à des fins alimentaires et à des fins énergétiques, sur la période 2006-2010. Ces chiffres sont difficilement comparables à notre résultat global de 13 000 ha de surfaces déplacées au total dus à l'augmentation de la consommation de biocarburants en France sur la période 2004-2009.

Si l'on examine les résultats par type de culture, notre analyse estime dans le scénario CARBFR à 24 000 ha les surfaces allant vers le colza sur la période, soit 4 800 ha par an en moyenne du fait du développement des biocarburants en France. Tandis que Chakir et Vermont évaluent les flux nets vers le colza à 10 400 ha/an, ajustement qui tient compte de l'ensemble des facteurs qui ont influencé les surfaces en colza en France et non le seul développement des biocarburants.

En gardant en tête les difficultés de comparaison des résultats des deux études, nous constatons que notre analyse évalue à 6 000 ha les surfaces allant vers le tournesol sur la période, soit 1 200 ha par an en moyenne contre 7 900 ha par an dans Chakir et Vermont. Dans notre étude, aucun impact du développement des biocarburants n'est visible sur les surfaces en betteraves en France¹⁴ alors que Chakir et Vermont constatent un flux net de 6 200 hectares par an vers cette culture. Enfin, Chakir et Vermont observent un accroissement de 36 800 hectares par an des surfaces en blé, en moyenne sur 2006-2010. Or, dans notre étude, les résultats de simulations indiquent plutôt un effet négatif du développement des biocarburants sur les surfaces en blé françaises, -2 000 ha/an environ dans le scénario CARBFR.

Tableau 40 : Flux nets de surfaces agricoles et non agricoles vers chaque culture dans l'étude de Chakir et Vermont (2013)

	Colza	Tournesol	Blé	Betteraves	Total par an
Flux nets ha/an 2006-2010 des usages non agricoles (sols boisés, sols naturels, sols artificialisés)	-100	400	-6200	-300	-6200
Flux nets ha/an 2006-2010 des usages agricoles (autres terres arables, STH et jachères)	10500	7500	43000	6500	67500
Total flux nets ha/an des surfaces agricoles et non agricoles vers chaque culture	10400	7900	36800	6200	61300

Source : Chakir et Vermont (2013)

Au total, nous constatons des écarts importants entre nos résultats et ceux de Chakir et Vermont (2013). Ceci n'est néanmoins pas étonnant puisque notre étude mesure le seul impact du développement des biocarburants en France sur les surfaces cultivées en grandes cultures en France et dans le monde, tandis que Chakir et Vermont examinent l'évolution des surfaces cultivées en grandes cultures, en France, évolution résultant d'une multitude de facteurs, dont le développement des biocarburants en France.

Ainsi, on peut interpréter les résultats des deux études de la manière suivante : sur une mise en culture annuelle de 10 400 ha de colza constatée en France entre 2006 et 2010, notre étude attribue 4 800 ha à l'augmentation de la demande française de biocarburants ; de même, sur l'accroissement constaté des surfaces en blé de 36 800 ha/an, le développement des biocarburants en France a, selon notre étude, plutôt eu tendance à réduire ces surfaces de 2 000 ha/an.

¹⁴ Il s'agit en effet de 220 ha de betteraves en France sur toute la période considérée dans le scénario CARBFR.

4. Perspectives pour des travaux futurs

MATSIM-LUCA est un modèle d'équilibre partiel des marchés et des échanges de produits de grandes cultures, qui a été développé pour analyser les conséquences sur les marchés et en termes de changement d'affectation des sols de divers facteurs d'évolution, qu'ils soient structurels, politiques ou sociétaux. Le modèle peut, à ce titre, être mobilisé pour répondre à diverses questions, au-delà de celle du développement des biocarburants. Pour aller dans le sens d'un modèle adapté à l'analyse de nombreuses questions ayant trait au changement d'affectation des sols, un travail supplémentaire sur le modèle est néanmoins nécessaire.

Notre analyse de sensibilité a montré que nos résultats en termes de CAS sont très sensibles à certains paramètres, dont en particulier les élasticités d'expansion de la terre grandes cultures et des autres facteurs et intrants. Un travail supplémentaire sur la valeur de ces élasticités (revue de la littérature plus complète, dire d'experts supplémentaires, etc.) et sur leur différenciation géographique est nécessaire pour fonder empiriquement ces paramètres.

Nous avons également souligné la fragilité de nos résultats en termes de facteur CAS, fragilité liée au fait que notre modèle ne nous donne aucune indication sur l'usage antérieur/postérieur des hectares qui entrent/sortent de la surface cultivée en grandes cultures. L'élargissement de MATSIM-LUCA à l'élevage et aux produits animaux permettrait de pallier à une partie de ce problème puisque la conversion grandes cultures/cultures fourragères/prairies deviendrait alors endogène au modèle. Cet élargissement contribuerait également au travail sur l'élasticité d'expansion de la terre évoqué ci-dessus et, plus généralement, au travail qui nous semble nécessaire sur l'ensemble de la spécification de l'offre et de la demande de terre du modèle.

Par ailleurs, toujours dans la perspective de consolider nos résultats en termes de facteur CAS, nous devons conforter nos références et notre expertise quant aux transferts d'hectares entre surfaces agricoles et surfaces en forêt dans les différentes régions du monde. De Cara et al. (2012) par exemple a bien montré l'importance que peut avoir la prise en compte du front de déforestation dans les calculs de facteurs CAS notamment dans l'étude de Lapola et al. (2010).

Au-delà de la seule amélioration du modèle, les pistes de recherche envisagées concernent toutes analyses de situations pouvant conduire à des changements d'affectation des sols, de manière directe ou indirecte via des mécanismes de marchés. Les questions à l'étude sont par exemple l'analyse des effets indirects des changements de mode de production, tels que le passage à des modes de production plus extensifs en certains intrants (recours à plus de pâturages par exemple ou conversion à l'agriculture biologique, etc.). D'autres questions à l'étude portent sur les conséquences en termes de CAS de changements de régimes alimentaires de par le monde (évolution de la consommation de produits issus de l'agriculture biologiques par exemple ou de produits carnés ou animaux) ou encore, de manière plus générale, l'arbitrage entre sécurité alimentaire et usage des terres, au niveau mondial ou de grandes régions du monde.

Références

Al-Riffai, P., Dimaranan, B. and Laborde, D. (2010), *Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate*, Final Report for the Directorate General for Trade of the European Commission, International Food Policy Research Institute.
http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2010/march/tradoc_145954.pdf

Chakir, R. et Vermont, B. (2013). *Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les changements d'affectation des sols. Volet 1*. Rapport final pour l'ADEME, mars 2013.

DeCara, S., Gousebaïl, A., Grateau, R., Levert, F., Quemener, J., Vermont, B. (2012). *Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants*. Rapport final pour l'Ademe, mars 2012.

Dronne, Y., Gautier, P., Gohin, A., & Levert, F. (2003). *Oléosim – Modélisation du marché mondial des oléagineux*. INRA.

Edwards, R., Mulligan, D., Marelli, L. (2010). *Indirect Land Use Change from increased biofuels demand. Comparison of models and results for marginal biofuels production from different feedstocks*. European Commission JRC. Final report of the contract n. 070307/2008/517067/C3.

Forslund, A., Levert, F., Cuvelette, C., Le Mouël, C., Gohin, A. (2013a). *Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les changements d'affectation des sols. Volet 2 : Evaluation des effets du développement des biocarburants en France sur les marchés nationaux et internationaux des grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols : La base de données du modèle MATSIM-LUCA*. Rapport final pour l'ADEME, mars 2013.

Forslund, A., Levert, F., Gohin, A., Le Mouël, C. (2013b). *Etude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les changements d'affectation des sols. Volet 2 : Evaluation des effets du développement des biocarburants en France sur les marchés nationaux et internationaux des grandes cultures et sur le changement d'affectation des sols : Le modèle MATSIM-LUCA*. Rapport final pour l'ADEME, mars 2013.

Gohin, A. (2013). *Le changement d'affectation des sols induit par la consommation européenne de biodiésel : une analyse de sensibilité aux évolutions des rendements agricoles*. Working Papers SMART-LERECO, juin 2013.

Hertel, T, Rose, S., Tol, R., eds (2009). *Economic analysis of land use in global climate change policy*. Abingdon: Routledge.

InNuméri. (2012). *Analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés française et mondiaux (production agricoles, produits transformés et coproduits) et les changements d'affectation des sols*. rapport pour l'ADEME, rapport final, février 2012.

IPCC (2000). *Land use, land-use change and forestry*. Special report of the IPCC

Keeney, R., Hertel, T. W. (2009). *The Indirect Land Use Impacts of United States Biofuel Policies: The Importance of Acreage, Yield, and Bilateral Trade Responses*. *Amer. J. Agr. Econ.* 91(4)

Laborde, D. (2011). *Assessing the Land Use Change Consequences of European Biofuel Policies*. Final report for the Directorate General for Trade of the European Commission. IFPRI, October 2011.
http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2011/october/tradoc_148289.pdf

Lapola, D. M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., et al. (2010). Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(8), 3388-3393.

Le Mouél C. (2004). *Modelling land supply in the PEM Literature review, specification and calibration*. Report for the OECD, Directorate for Food, Agriculture and Fisheries.

Overmars, K.P., Stehfest, E., Ros, J.P., & Prins, A.G. (2011). Indirect land use change emissions related to EU biofuel consumption : an analysis based on historical data. *Environmental Science & Policy*.

Annexe A. Coefficients de transformation utilisés dans les analyses

Coefficients de conversion énergétique :

1 litre de biodiésel	= 0,89 kg
1 litre d'éthanol	= 0,78 kg
1 litre de biodiésel	= 0,79 kgEP (kg Equivalent Pétrole)
1 litre d'éthanol	= 0,5 kgEP
1 T de biodiésel	= 0,888 TEP (Tonne équivalent pétrole)
1 T d'éthanol	= 0,641 TEP
1 TEP	= 42 000 MJ (MegaJoules)
1 PJ (PetaJoule)	= 10 ^{E9} MJ
1 TJ (TeraJoule)	= 10 ^{E6} MJ

Coefficients d'émission carbone selon la région et le type de terre convertie (T CO₂/ha) :

	Forêt	Prairies
USA	760	106
CANADA	705	196
BRESIL	388	72
ARG	388	72
ASI_SE	937	85
ASI_SUD	574	196
CHINE	574	196
AFR_SUB	305	43
ASI_EST	574	85
AFR_NOR	152	82
THAI	937	85
AUS	388	98
MEX	388	72
EX_URSS	311	156
FR	297	156
UE hors FR	297	156
AUTRES	420	104

Source : Auteurs, d'après Edwards et al. (2010) et Hertel et al. (2009)

Annexe B. Repères sur la valeur énergétique et la production de coproduits des principales cultures

Valeur énergétique et production de coproduits des cultures oléagineuses :

Matière première considérée :	Colza	Tournesol	Soja	Régime de palme	Coprah
Zone de référence :	UE	UE	Arg	Asie_SE	Asie_SE
T/ha	3.3	1.77	2.9	21.9	0.6
T huile/T de MP	0.44	0.45	0.19	0.20	0.63
T biod/T de MP	0.42	0.43	0.18	0.19	0.60
TEP/T de MP	0.37	0.38	0.16	0.17	0.53
T tourteaux/T de MP	0.58	0.55	0.78	0.03	0.32
TEP/ha	1.22	0.68	0.47	3.69	0.32
T de coproduit/ha	1.91	0.97	2.26	0.58	0.19

Valeur énergétique et production de coproduits des céréales :

Matière première considérée :	Maïs	Blé	Bett	Canne
Zone de référence :	US	UE	UE	Brésil
T/ha	10.3	5.3	64.2	80.4
T sucre/T de MP			0.17	0.09
T éthanol/T de MP	0.32	0.28	0.08	0.06
TEP/T de MP	0.21	0.18	0.05	0.04
T coproduit/T de MP	0.37	0.3	0.05	0
TEP/ha	2.11	0.95	3.29	3.09
T coproduit/ha	3.81	1.59	3.21	0.00