



HAL
open science

Les effets économiques et environnementaux d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants : le cas de la France

Basak Bayramoglu, Jean-François Jacques

► **To cite this version:**

Basak Bayramoglu, Jean-François Jacques. Les effets économiques et environnementaux d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants : le cas de la France. *Revue d'économie politique*, 2016, 126 (3), pp.399. 10.3917/redp.263.0399 . hal-02877013

HAL Id: hal-02877013

<https://hal.science/hal-02877013>

Submitted on 21 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

*Les Effets Economiques et Environnementaux d'une Politique d'Incorporation
Obligatoire de Biocarburants : le cas de la France*

19.10.2015

Basak BAYRAMOGLU¹ et Jean-François JACQUES^{2 3}

Résumé : L'objectif de ce travail est d'évaluer, dans le cas de la France, les effets économiques et environnementaux d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants par rapport à une taxe sur le carburant fossile. Cette politique est également comparée à la solution de laissez-faire (l'absence de biocarburant comme source d'énergie). Ce travail évalue aussi les effets d'interaction de la politique d'incorporation obligatoire de biocarburants lorsqu'elle est utilisée conjointement avec une taxe sur le carburant fossile. Cette évaluation de l'efficacité des politiques énergétiques non-nécessairement optimales, inspirées du cas français est fondée sur un modèle d'équilibre général qui prend en compte les externalités dues aux émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces émissions proviennent non seulement du raffinage et de la consommation du carburant fossile, mais aussi de l'usage des biocarburants incluant les changements d'affectation des sols. En utilisant les données françaises de biodiesel à base de colza pour 2010, nos résultats numériques indiquent d'une part que la politique de taxe du gazole est la meilleure politique en termes de bien-être car elle permet des économies significatives en émissions de GES. D'autre part, nos résultats numériques montrent que la politique d'incorporation de biocarburants est

¹INRA-AgroParisTech, UMR 210 Economie Publique, F-78850 Thiverval-Grignon, France. E-mail: Basak.Bayramoglu@grignon.inra.fr.

²Université Paris-Est, ERUDITE (EA 437), UPEM 77454 Marne la Vallée, France et LEDa-CGEMP, Université Paris-Dauphine, Paris, France. E-mail: Jean-Francois.Jacques@u-pem.fr.

³Nous tenons à remercier particulièrement Stéphane de Cara, qui a contribué à la première version de cet article, pour son aide précieuse apportée à cette version. Nous remercions également pour leurs commentaires Jean-Marc Bourgeon, Annie Kawecki, Philippe Chalmin, Mireille Chiroleu-Assouline et les rapporteurs anonymes. Nous remercions enfin les participants au Congrès EAAE, Ghent (août 2008), à la Conférence AES, Dublin (mars 2009), au Congrès de l'AFSE, Paris (septembre 2009) et au Congrès WCERE, Montréal (juillet 2010) pour leurs commentaires. Nous sommes seuls responsables des éventuelles erreurs restantes.

la politique la moins souhaitable en termes de bien-être. Toutefois si le prix du colza en 2010 avait été suffisamment bas, alors une combinaison de taxe du gazole avec une incorporation obligatoire de biocarburants aurait été préférable à une taxe du gazole.

Mots-clés : biocarburant, politique d'incorporation, taxe, carburant fossile, environnement, bien-être, France.

The economic and environmental effects of a biofuel mandate policy: the case of France

Abstract : This study evaluates for France the impacts of three energy policy alternatives on biofuel use, on GHG emissions and on welfare. A biofuel mandate is compared with a tax policy on conventional fuel and a benchmark case of a laissez-faire solution (the absence of biofuel as an energy source). This study also evaluates the interaction effects of a biofuel mandate when it is used simultaneously with a tax on conventional fuel. The evaluation of the relative efficiency of second-best energy policy alternatives, inspired from the French case, is based on a general equilibrium model taking into account the externalities due to greenhouse gas (GHG) emissions. The emissions come from conventional fuel refining and consumption as well as from biofuel use and the associated land-use changes. Using French biodiesel data involving rapeseed for 2010, our numerical results show, on the one hand, that the tax policy on conventional fuel appears to be the best policy option in terms of welfare because it leads to significant reductions in GHG emissions. On the other hand, our numerical results show that the biofuel mandate is the worst policy option in terms of welfare. However, if the price of rapeseed in 2010 were low enough, then a combination of the tax on gasoline with a biofuel mandate would have been preferable to the tax on gasoline.

Keywords: biofuel mandate policy, tax, conventional fuel, environment, welfare, France; *Codes JEL* : H23, Q16, Q54, Q58.

1 Introduction

Les biocarburants ont été présentés comme une source d'énergie plus propre que les carburants fossiles. L'étude JRC-EUCAR-CONCAWE (JEC) (2007)⁴ réalisée par le Joint Research Center (JRC) de la Commission Européenne, concluait que la plupart des biocarburants permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre (dorénavant notés, GES) de 18 à 50% par rapport aux carburants fossiles (JRC, 2008b, p.8). Cette étude a pris en compte uniquement les émissions de GES associées à la production des carburants et à l'usage des véhicules. Cependant, il existe de plus en plus de preuves scientifiques qui remettent en cause les bénéfices environnementaux des biocarburants. En particulier, le bilan environnemental des biocarburants se dégrade sensiblement lorsque les émissions additionnelles dues aux effets des "changements d'affectation des sols" (dorénavant notés, CAS) sont pris en compte (Searchinger et al., 2008).⁵

Dans l'Union Européenne, des mesures de promotion des biocarburants sont essentiellement justifiées par la nécessité de réduire les émissions de GES dans le secteur des transports (JRC, 2008b). A ce titre, le développement des biocarburants devait être stimulé à cause de leur différentiel de coûts de production par rapport aux carburants fossiles.⁶ Dans l'Union Européenne, la directive «Energie Renouvelable» 2009/29/CE et la directive «Qualité des Carburants» 2009/30/CE régissent la con-

⁴Les résultats associés aux biocarburants de cette étude ont été pris de JRC (2008a).

⁵Les émissions de GES dues aux CAS proviennent de la hausse du prix agricole associé à l'augmentation de la demande pour la matière première agricole, par exemple le colza pour produire du biodiesel. Cette incitation à la production se traduit par des conversions de terre destinées à produire des biocarburants ("les émissions de CAS directes") et par des conversions vers d'autres usages (alimentaires par exemple) qui n'auraient pas eu lieu sans le développement des biocarburants ("les émissions de CAS indirectes"). Ces conversions provoquent la libération de carbone stocké dans les sols (De Cara et al., 2012, p.10).

⁶Ryan et al. (2006) reportent un différentiel de coûts de 559 euros (prix de 2004) par 1000 litres entre la plupart des biodiesel à base d'huiles et les carburants fossiles avant les droits d'accise et la TVA.

sommation d'énergie renouvelable dans les transports et la qualité des carburants en termes d'émissions de GES. La directive « Energie Renouvelable » fixe un objectif obligatoire de 10 % d'énergies renouvelables dans les transports pour 2020. Ces objectifs d'incorporation sont néanmoins sujets à des critères de durabilité : les biocarburants éligibles doivent réduire d'au moins 35% les émissions de GES par rapport aux carburants fossiles en 2010. Ce pourcentage doit augmenter dans le temps : 45% en 2013, 50% en 2017 et 60% pour les nouvelles unités de production. Les Etats membres sont libres dans le choix d'instruments économiques pour d'atteindre les objectifs d'incorporation obligatoires de biocarburants. A ce titre, la directive 2003/96/CE autorise les Etats membres à mettre en place des mesures de défiscalisation afin d'encourager l'utilisation des biocarburants (Guindé et al., 2008). Le coût élevé des financements publics requis pour soutenir l'industrie des biocarburants, dont le bilan environnemental est moins positif qu'on ne le pensait initialement, a conduit les pays européens, dont la France, à modifier leur politique de soutien : les politiques de subventions directes et de déductions fiscales sont remplacées par des politiques nationales d'incorporation obligatoire de biocarburants. À l'heure actuelle, le coût des politiques de biocarburants est donc supporté davantage par les consommateurs de carburants que par les contribuables.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'ensemble des effets économiques et environnementaux d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants actuellement utilisée en France. En particulier, ce travail compare en termes de bien-être cette politique d'incorporation obligatoire de biocarburants à la politique française de taxation du carburant fossile, et à la solution de laissez-faire (décrite par l'absence de biocarburant comme alternative énergétique). Ce travail a également pour objectif d'évaluer les interactions de ces deux politiques énergétiques : comment les effets d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants se combinent-ils avec

ceux d'une taxe sur le carburant fossile? Cette évaluation de l'efficacité des politiques énergétiques non-nécessairement optimales, inspirées du cas français est basée sur un modèle d'équilibre général, qui prend en compte les externalités dues aux émissions de GES dans la fonction d'utilité des agents. Ce modèle est ensuite calibré puis simulé. Nous calibrons notre modèle de petite économie ouverte grâce à des données sur la production française de biodiesel à base de colza en 2010.⁷

L'étude de la comparaison de l'efficacité des différentes politiques énergétiques est motivée par des gains et des coûts différents associés à chaque politique. Une taxe sur le carburant fossile augmente le prix du carburant fossile qui est polluant et donc en réduit la consommation. La redistribution du rendement de la taxe provoque un effet revenu positif pour le bien composite. Cette taxe a aussi pour but la consommation de biocarburant car sans cette taxe le biocarburant est plus coûteux que le carburant fossile. Lorsqu'il est mélangé au carburant fossile, le biocarburant en réduit la consommation. Cependant l'usage du biocarburant provoque deux effets négatifs. Il produit un conflit d'usage avec la consommation de colza et il peut éventuellement provoquer des émissions de GES par des changements d'affectation des sols. L'objet de cet article est précisément d'évaluer si, en France, les effets désirés de l'intégration des biocarburants dominant en termes de bien-être économique d'une part les effets négatifs liés à son usage et d'autre part dominant également les effets positifs liés à la taxe. La question annexe est de savoir si l'imposition d'une incorporation obligatoire de biocarburants en présence ou en absence d'une taxe sur le gazole fournit de meilleurs résultats en termes de bien-être.

⁷Nous avons choisi l'année 2010 pour les applications numériques car cette année correspond à l'augmentation significative du prix de colza en France. Le prix de colza a augmenté de 35% entre 2006 et 2010, passant de 261 euros/tonne à 416 euros/ tonne (Agreste). Par ailleurs, le dernier rapport de l'Ademe (2012) fournit des informations et statistiques jusqu'à 2010 concernant le développement des biocarburants. Nous effectuons, en outre, une analyse de sensibilité des résultats du modèle sur les données de l'année 2009.

La France représente en effet un cas d'étude intéressant car elle est un producteur important de biodiesel au niveau mondial (2ème producteur en Europe après l'Allemagne) : elle fournit 10,6% de la production mondiale de biodiesel (Cour des Comptes, 2012). La France, dans le cadre du "paquet énergie-climat" adopté en 2008, prévoit de réduire de 14% ses émissions de GES dans les secteurs dits diffus (transport, bâtiment, agriculture) et de parvenir à une part des énergies renouvelables de 23% en 2020 (Cour des Comptes, 2013). Dans cet objectif, elle a mis en place des objectifs d'incorporation ambitieux : 7% de biocarburants dans les carburants en 2010, et 10% en 2015. Ces objectifs peuvent être considérés comme obligatoires.⁸ En outre, les unités de production de biocarburants reçoivent des subventions sous forme de défiscalisations partielles sur la Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques (TICPE) (Cour des Comptes, 2012). Pour des raisons budgétaires, ces subventions ont été réduites sensiblement entre 2004 et 2013, et vont disparaître à l'horizon de 2016.

Il existe une littérature assez vaste sur l'analyse de bien-être des mesures de soutien aux biocarburants.⁹ Par exemple, De Gorter et Just (2009b) ont évalué, dans un modèle d'équilibre partiel, les effets d'une politique d'incorporation de biocarburants et d'une politique de défiscalisation des biocarburants considérées conjointement. Ils montrent qu'une défiscalisation des biocarburants (subvention à la production), dans un contexte où il existe un objectif d'incorporation obligatoire de biocarburants, revêt le caractère d'une subvention à la consommation car elle diminue le prix du carburant.

⁸En France, les distributeurs de carburants qui ne respectent pas les objectifs d'incorporation de biocarburants doivent acquitter un supplément à la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP). Le niveau de cette taxe est suffisamment persuasif pour rendre effective la politique d'incorporation française.

⁹Voir, entre autres, Gardner (2007), Martinez-Gonzales et al. (2007), Schmitz et al. (2007), Babcock (2008), Elobeid et Tokgoz (2008), Du et al. (2009), de Gorter et Just (2009a), et de Gorter et Just (2009b). De Gorter et Just (2010) présentent une discussion des résultats obtenus dans la littérature sur les mesures de soutien aux biocarburants.

Cette politique a donc pour effet d'augmenter la consommation totale de carburants. Ces modèles ne prennent pas en compte les externalités dues aux émissions de GES associées à la production et à la consommation de carburants. Ces analyses se concentrent essentiellement sur l'industrie d'éthanol aux États-Unis.

D'autres études ont effectué une analyse de bien-être des mesures de promotion aux biocarburants en présence d'externalités environnementales.¹⁰ Lapan et Moschini (2012) montrent, dans un modèle d'équilibre général, qu'une politique d'incorporation obligatoire d'éthanol est équivalente à une combinaison, neutre en termes de revenus, d'une taxe sur le carburant et d'une subvention à l'éthanol. La spécificité de leur modèle repose d'une part sur l'étude des politiques optimales, et d'autre part, sur l'hypothèse d'un grand pays ouvert qui permet de capter ainsi les effets des politiques sur le bien-être qui transitent par les termes de l'échange. Cette hypothèse se justifie dans le cas des États-Unis qui est un grand exportateur de maïs, et producteur et importateur de pétrole au niveau international. Cui et al. (2011) étendent le modèle théorique de Lapan et Moschini (2012) afin de fournir les estimations quantitatives des impacts sur le bien-être des diverses mesures de promotion à l'éthanol aux États-Unis.¹¹ Ils montrent, dans un contexte où la taxe sur le carburant est fixée, qu'une politique d'incorporation obligatoire d'éthanol est meilleure, en termes de bien-être, qu'une subvention à la production d'éthanol.

Les études qui ont été essentiellement menées sur l'éthanol aux États-Unis cherchent à comparer les deux mesures de promotion aux biocarburants entre elles : l'objectif

¹⁰Voir, entre autres, Khanna et al., (2008), Bourgeon et Treguer (2010), Cui et al. (2011) et Lapan et Moschini (2012).

¹¹Les impacts des mesures de promotion des biocarburants ont été aussi examinés dans le cas de la France sans la prise en compte explicite des externalités environnementales. Voir par exemple Rozakis et Sourie (2005), Bernard et Prieur (2007), et Guindé et al. (2008). Bernard et Prieur (2007) ont évalué les mesures futures sur les biocarburants en élaborant des scénarios prospectifs. A l'aide d'une analyse de cycle de vie, ils évaluent les économies d'émissions de GES associées à chaque scénario.

d'incorporation et la subvention à la production de biocarburants à politique fiscale donnée. Notre objectif est différent puisque la politique de subvention est condamnée à disparaître en 2016 en France. Nous cherchons à comparer deux politiques énergétiques non-nécessairement optimales, actuellement utilisées en France : la taxe sur le carburant fossile et l'objectif d'incorporation de biocarburants. Est-ce que la politique d'incorporation de biocarburants, combinée ou non à une politique de taxation, est un meilleur instrument pour réduire les émissions de GES et augmenter le bien-être qu'une seule politique de taxe sur le carburant fossile traditionnelle?

Cet article est organisé de la manière suivante. La Section 2 présente le cadre du modèle. Dans la Section 3, nous déterminons les différents équilibres associés aux différents arrangements institutionnels à l'étude, comme la solution de laissez-faire, la politique d'incorporation obligatoire de biocarburants, la politique de taxe du carburant fossile, et la politique d'incorporation utilisée conjointement avec une taxe sur le carburant fossile. Dans la Section 4, après avoir effectué la calibration des paramètres à l'aide des données, nous réalisons des applications numériques. Une analyse de sensibilité des résultats aux valeurs des paramètres est alors conduite. La Section 5 conclut.

2 Le Modèle

On considère une économie avec concurrence parfaite similaire à celle représentée par Lapan et Moschini (2012). Elle comporte 7 agents : un consommateur représentatif, un producteur de colza, un producteur de gazole, un producteur de biocarburant, un distributeur de carburant, un producteur du bien composite, un gouvernement et l'Extérieur. Dans cette économie, nous comptons 8 biens : le carburant, mixte du gazole et du biocarburant, indicé par F avec le prix p_F , le gazole indicé par G avec

le prix p_G , le biocarburant indicé par B avec le prix p_B , le pétrole brut indicé par O avec le prix p_O , le colza indicé par A avec le prix p_A , le bien composite indicé par y avec le prix p_y , le travail noté L , supposé numéraire avec le prix ($w = 1$), et la terre notée K avec le prix τ . La demande et l'offre pour chaque produit sont notées par les indices D et S , respectivement.

Les biocarburants de première génération sont produits à partir des matières premières agricoles. Dans le cas de la production d'éthanol, le bien agricole peut être de la canne à sucre, du maïs ou du blé, et dans le cas de la production de biodiesel, il peut être du tournesol ou du colza. Nous considérons le cas du colza et supposons l'existence d'un conflit d'usages du colza soit à des fins alimentaires soit comme input à la production de biocarburants.

Nous supposons que cette économie est une petite économie ouverte.¹² Elle importe du pétrole brut (les importations de pétrole brut notées M_O) à un prix international donné p_O . Ceci implique que l'offre du pétrole brut est parfaitement élastique au niveau du prix p_O . Elle exporte du bien composite (les exportations du bien composite notées Y) et du colza¹³ (les exportations du colza notées X_A) aux prix internationaux donnés p_y et p_A respectivement. L'hypothèse de petite économie ouverte pour le colza mérite d'être discutée davantage. La France est le 5ème pays producteur de colza (2ème en Europe après l'Allemagne), sa production représentant 8% de la production mondiale en 2010 (FAOSTAT). Le producteur dominant du marché est cependant la Chine avec une part de production de 22%. Ces dernières années, dans la formation du prix du colza mondial, des facteurs de demande sont devenus primordiaux avec le développement des biocarburants. En effet, le biodiesel est produit à partir des huiles de colza, de soja ou de palme. Ces huiles végétales

¹²Cui et al. (2011) et Lapan et Moschini (2012) modélisent une "grande économie ouverte", ce qui se justifie dans le cas des États-Unis.

¹³La France a été un exportateur net de graines de colza en 2010 (Ademe, 2012).

sont donc en concurrence comme matière première agricole pour la production de biodiesel dans le monde. Le prix mondial de colza est donc intimement lié au prix de l'huile de soja, en particulier le soja américain. Même si le colza est la graine oléagineuse la plus importante en Europe, elle occupe une place moins importante au niveau mondial. La production de soja est la plus importante, avec une production de 259.9 Mt en 2009/10, contre 61.7 Mt pour le colza (Busse et al., 2010). De façon générale, le marché des oléagineux est un marché intégré. Par exemple, Busse et al. (2012) ont montré que les prix d'huile de colza et d'huile de soja sont cointégrés. En conséquence, même si le prix mondial du colza peut être influencé par la production française, son influence est probablement suffisamment faible pour que nous puissions supposer que le prix est exogène.

Nous ne prenons pas en compte le commerce international de biocarburant. Cette hypothèse se justifie étant donné les niveaux bas des volumes de biodiesel importés à cause des barrières non-tarifaires, comme les normes techniques pour le commerce de l'huile de palme, malgré la faiblesse des tarifs douaniers sur les importations du biodiesel (Guindé et al., 2008).¹⁴

Nous prenons en compte les émissions de GES, comme les émissions de CO₂ et de N₂O, résultant, entre autres, de l'utilisation des carburants dans le secteur des transports. Nous considérons une fonction d'émission linéaire :

$$EM = EM_G + EM_B = \sigma_G \times x_G + \sigma_B \times x_B \quad (1)$$

où EM_G représentent les émissions de GES provoquées par le raffinage et la consommation du gazole, et EM_B représentent les émissions de GES provoquées par la production, le transport et la distribution des biocarburants, ainsi que par la pro-

¹⁴Cui et al. (2011) et Lapan et Moschini (2012) introduisent la même hypothèse en la justifiant de l'existence des barrières tarifaires prohibitives pour les importations d'éthanol aux États-Unis.

duction agricole de la matière première agricole et par les changements directs et indirects d'affectation des sols. σ_G et σ_B sont des constantes positives et x_G , x_B sont les quantités produites en gazole et en biocarburant. En France, en ce qui concerne le biodiesel à base de colza, l'Analyse du Cycle de Vie (notée ACV dorénavant) conduite par l'Ademe (2010) indique que la production agricole compte pour 75% des émissions de GES alors que la production, le transport et la distribution des biocarburants y contribuent à hauteur de 25%.¹⁵ Ici, nous proposons de prendre en compte toutes les émissions de GES dues à l'utilisation de biodiesel.

2.1 Consommation

Il existe un consommateur-travailleur preneur de prix, qui offre \bar{L} unités de travail de façon inélastique à quatre secteurs d'activité (l'agriculture L_A , le biocarburant L_B , le gazole L_G et le bien composite L_y). Le travail est mobile entre secteurs, et donc le salaire est unique. Le consommateur est le propriétaire de la terre (de taille \bar{K}) et la rente annuelle payée par l'agriculteur est τ . Le consommateur reçoit également le profit agricole π_A .

L'utilité du consommateur dépend positivement de la consommation du bien composite y , du colza x_A et du carburant x_F . Il supporte les dommages dus aux émissions de GES. La fonction de dommages est linéaire et s'écrit : $D = d \times EM$ avec $d > 0$. Le paramètre d représente les dommages par unité d'émissions de GES.

Le programme du consommateur s'écrit :

¹⁵Cette étude ne considère pas les émissions de GES provenant des CAS provoqués par le développement des biocarburants. Elle se contente de proposer quelques analyses de sensibilité basées sur des scénarios alternatifs sur l'étendue des CAS.

$$\max_{y, x_A, x_F} U = y + x_A^\theta + x_F^\varphi - d \times EM \quad (2)$$

$$\text{sous contrainte budgétaire } R = w\bar{L} + \tau\bar{K} + \pi_A = p_A x_A + p_F x_F + p_y y$$

où θ et φ sont des paramètres positifs, avec $\theta < 1$ et $\varphi < 1$. Les préférences du consommateur sont quasi-linéaires, hypothèse reprise de Lapan et Moschini (2012). Cette hypothèse implique d'une part que les élasticités de prix-croisé du colza et du carburant sont nulles, et d'autre part, que les effets revenus ne portent que sur le bien composite.

Les demandes de colza, de carburant et de bien composite du consommateur sont données respectivement par :

$$\begin{aligned} x_A^D &= \left(\frac{p_A}{p_y \theta} \right)^{\frac{1}{\theta-1}} \\ x_F^D &= \left(\frac{p_F}{p_y \varphi} \right)^{\frac{1}{\varphi-1}} \\ y^D &= \frac{R}{p_y} - \frac{p_A}{p_y} x_A - \frac{p_F}{p_y} x_F \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 Production

Nous supposons que l'agriculteur utilise une technologie de production Cobb-Douglas¹⁶ à rendements d'échelle décroissants¹⁷ : $x_A = cL_A^\alpha K^{\alpha'}$, avec $c > 0$ et $(\alpha + \alpha') < 1$.¹⁸ L_A est le travail dans le secteur agricole, et K est la terre dédiée à la production de colza. L'offre agricole (x_A^S) est utilisée pour la consommation alimentaire (x_A^D), comme matière première agricole pour la production de biocarburant (\tilde{x}_A), et pour les exportations vers le reste du monde (X_A) : $x_A^S = x_A^D + \tilde{x}_A + X_A$.

Le programme de l'agriculteur s'écrit :

$$\max_{L_A, K} \pi_A = p_A x_A^S - wL_A - \tau K \text{ sous contrainte } 0 < L_A < \bar{L}, 0 < K < \bar{K} \quad (4)$$

La résolution de ce programme implique deux relations :

$$L_A = \frac{\tau \bar{K}}{w} \frac{\alpha}{\alpha'} \quad (5)$$

$$x_A^S = cL_A^{\alpha+\alpha'} \left(\frac{w \alpha'}{\tau \alpha} \right)^{\alpha'} \quad (6)$$

Dans le modèle, le gazole est produit à partir du travail et du pétrole brut importé.

Nous supposons une fonction de production Leontief (proportions fixes) qui s'écrit :

$x_G = \min \{ \beta x_O, aL_G \}$ où β et a sont des paramètres de production positifs. Cette

spécification implique :

¹⁶Nous retenons une fonction de production Cobb-Douglas pour des raisons de simplicité. En dépit de la constance de l'élasticité de substitution, cette fonction permet de représenter la substituabilité imparfaite du travail et de la terre pour la production agricole.

¹⁷L'existence des rendements d'échelle décroissants se justifie par l'absence de prise en compte du capital agricole et de son marché. Sa rémunération via le profit est néanmoins redistribuée au consommateur.

¹⁸Ici, nous supposons que l'agriculteur ne produit qu'une seule culture car notre objectif n'est pas d'étudier l'impact des mesures de promotion des biocarburants sur l'usage des sols (voir par exemple Mallory et al., 2011).

$$x_G = \beta x_O = aL_G \quad (7)$$

Le biocarburant est produit à partir du travail et du colza. De façon similaire, nous supposons une fonction de production Leontief qui s'écrit : $x_B = \min \{\mu\tilde{x}_A, bL_B\}$ où μ et b sont des paramètres de production positifs. Cette spécification implique :

$$x_B = \mu\tilde{x}_A = bL_B \quad (8)$$

Enfin, le bien composite est produit à partir du travail avec une technologie linéaire :

$$y = eL_y \quad (9)$$

où e est un paramètre de production positif. L'offre du bien composite y^S est utilisée pour la consommation domestique y^D et pour les exportations Y : $y^S = y^D + Y$.

Les formes fonctionnelles retenues pour la production de gazole, de biocarburant et du bien composite impliquent des fonctions de coût de production linéaires¹⁹ $(\frac{p_O}{\beta} + \frac{w}{a})x_G$, $(\frac{p_A}{\mu} + \frac{w}{b})x_B$ et $(\frac{w}{e})y$. Par conséquent, les prix d'offre du gazole, du biocarburant et du bien composite sont donnés par :

$$p_G = \frac{p_O}{\beta} + \frac{w}{a} \quad (10)$$

$$p_B = \frac{p_A}{\mu} + \frac{w}{b} \quad (11)$$

¹⁹De Gorter et Just (2009b), Cui et al.(2011), et Lapan et Moschini (2012) emploient la même hypothèse pour la production d'éthanol.

$$p_y = \frac{w}{e} \quad (12)$$

Le distributeur de carburant mélange les deux sources d'énergie, le gazole et le biocarburant :

$$x_F = x_G + x_B \quad (13)$$

Nous considérons ici le biocarburant exprimé en équivalent énergétique par rapport au gazole.²⁰ Dans le modèle, nous supposons que le biocarburant, corrigé en termes d'équivalence énergétique, est un substitut parfait au gazole pour la production de carburant.

3 La Caractérisation des Equilibres

Dans un premier temps, nous représentons les propriétés d'équilibre général de cette économie. Dans un second temps, nous analysons les effets des politiques énergétiques sur l'utilisation des biocarburants et sur les émissions de GES, ainsi que sur le bien-être des agents. Les politiques qui sont examinées sont respectivement un objectif d'incorporation de biocarburants, une taxe sur le gazole, et enfin la combinaison d'une taxe sur le gazole et l'objectif d'incorporation de biocarburants (appelé, dorénavant, la politique de taxe & incorporation).²¹

Nous supposons que les exportations du colza X_A sont données car elles dépendent du prix de colza qui est exogène. Dans le cas de la politique de taxe sur le gazole et seulement dans ce cas, nous supposons en plus, afin de résoudre l'équilibre, que les importations du pétrole brut M_O sont données.

²⁰Le biocarburant a moins de contenu énergétique que le gazole.

²¹Les programmes de résolution des équilibres sont disponibles sur demande auprès des auteurs.

3.1 L'équilibre décentralisé de laissez-faire

La solution de laissez-faire, avant la mise en place des politiques énergétiques, est décrite par une situation dans laquelle seul le gazole est distribué. Ceci implique que le biocarburant n'est pas offert par le distributeur à l'équilibre décentralisé ($x_B = \tilde{x}_A = L_B = 0$) car son prix p_B , défini par $(\frac{p_A}{\mu} + \frac{w}{b})$, est plus élevé que le prix du gazole p_G , défini par $(\frac{p_O}{\beta} + \frac{w}{a})$. La condition $(\frac{p_A}{\mu} + \frac{w}{b} > \frac{p_O}{\beta} + \frac{w}{a})$ doit donc être vérifiée à l'équilibre. Dans ce cas, la fonction de production du distributeur s'écrit de la façon suivante :

$$x_F = x_G \text{ avec } p_F = p_G \quad (14)$$

Les relations d'équilibres sur les différents marchés sont :

$$\text{Carburant (gazole)} : x_F^S = x_F^D \Leftrightarrow \beta x_O = aL_G = \left(\frac{p_F}{p_y \varphi} \right)^{\frac{1}{\varphi-1}} \quad (15)$$

$$\text{Colza} : x_A^S = x_A^D + X_A \Leftrightarrow cL_A^{\alpha+\alpha'} \left(\frac{w}{\tau} \frac{\alpha'}{\alpha} \right)^{\alpha'} = \left(\frac{p_A}{p_y \theta} \right)^{\frac{1}{\theta-1}} + X_A \quad (16)$$

$$\text{Pétrole} : M_O = x_O \Leftrightarrow M_O = \frac{x_G}{\beta} = \frac{aL_G}{\beta} \quad (17)$$

$$\text{Numéraire} : y^S = y^D + Y \Leftrightarrow eL_y = \left[\frac{w}{p_y} (L_G + L_y) + \frac{p_A}{p_y} X_A - \frac{p_F}{p_y} x_F \right] + Y \quad (18)$$

$$\text{Travail} : \bar{L} = L_y + L_A + L_G \Leftrightarrow \bar{L} = \left[\frac{y^D + Y}{e} \right] + \left[\frac{\alpha p_A x_A^S}{w} \right] + \left[\frac{x_G}{a} \right] \quad (19)$$

$$\text{Terre : } \bar{K} = \frac{\alpha p_A x_A^S}{\tau} \quad (20)$$

$$\text{Balance commerciale : } p_A X_A + p_y Y = p_O M_O = p_O x_O \quad (21)$$

Les variables exogènes du modèle sont : p_A , p_O , $w = 1$, \bar{L} , \bar{K} et X_A . En utilisant les valeurs de ces variables exogènes et d'autres paramètres, il est possible d'obtenir les expressions des variables endogènes du modèle en résolvant le système d'équations suivant : Equations 3, 6, 7, 10, 11, 12, 14, et les sept relations d'équilibre décrites ci-dessus. Le niveau des émissions à l'équilibre est donné par $EM^* = \sigma_G \times x_G^*$.²² Cette dernière expression avec les demandes des biens déterminent l'utilité du consommateur à l'équilibre : $U^* = y^* + x_A^{*\theta} + x_F^{*\varphi} - d \times EM^*$.

Nous caractérisons dans la section suivante les propriétés d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants.

3.2 Politique d'incorporation obligatoire de biocarburants

Cette politique consiste à fixer la part de biocarburants qui doit être introduite dans les carburants vendus par le distributeur d'énergie. Comme cette politique est neutre en termes fiscaux pour le consommateur, les demandes du consommateur sont calculées de la même façon qu'à l'équilibre décentralisé. Avec un taux d'incorporation ρ de biocarburants dans les carburants distribués, cette politique implique la satisfaction de la contrainte suivante par le distributeur de carburants :

$$x_B = \rho x_F \iff x_B = \rho(x_G + x_B) \iff x_B = \frac{\rho}{1 - \rho} x_G \iff x_B = \varepsilon x_G \quad (22)$$

²²L'indice (*) désigne les variables à l'équilibre.

qui signifie que la quantité de biocarburant x_B représente ρ pourcent du mélange de gazole avec du biocarburant. Cette contrainte est considérée comme liante car la politique française d'incorporation est quasi-obligatoire.

A partir des équations $x_F = x_G + x_B$ et $x_B = \varepsilon x_G$, on déduit une relation entre les prix des produits énergétiques²³ :

$$p_F = \frac{1}{1 + \varepsilon} p_G + \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} p_B \quad (23)$$

La section suivante examine les propriétés de la mise en place d'une taxe sur le carburant fossile.

3.3 Politique de taxe du carburant fossile

La politique de taxe consiste à imposer une accise t sur l'achat du gazole x_G par le distributeur de carburants. Nous modélisons cette politique de taxe de sorte que le biocarburant devienne rentable sur le marché. En effet, le prix (taxe comprise) du gazole est fixé comme étant égal au prix du biocarburant :

$$p_B = p_G + t \quad (24)$$

Cette contrainte nous donne le niveau endogène de la taxe :

$$t = p_B - p_G \quad (25)$$

Comme $x_F = x_G + x_B$, le prix du carburant est donné par :

²³Voir Annexe A1 pour les détails concernant la résolution de l'équilibre avec l'incorporation obligatoire de biocarburants.

$$p_F = \frac{p_B + (p_G + t)}{2} \quad (26)$$

Les Equations 24 et 26 impliquent :

$$p_F = p_B = p_G + t \quad (27)$$

Nous notons que les demandes de gazole et de biocarburant sont indéterminées car leur prix est identique. C'est l'offre des deux biens qui va déterminer leur quantité à l'équilibre.

Avec une taxe $t > 0$, la contrainte budgétaire est modifiée car elle inclut maintenant le revenu supplémentaire provenant de la taxe T . La nouvelle contrainte budgétaire s'écrit comme suit : $R = w\bar{L} + \tau\bar{K} + \pi_A + T = p_A x_A^D + p_F x_F + p_y y$. Les demandes du consommateur sont égales à :

$$\begin{aligned} x_A^{DT} &= \left(\frac{p_A}{p_y \theta} \right)^{\frac{1}{\theta-1}} \\ x_F^{DT} &= \left(\frac{p_F}{p_y \varphi} \right)^{\frac{1}{\varphi-1}} \\ y^{DT} &= \frac{w}{p_y} (L_G + L_B + L_y) + \frac{T}{p_y} + \frac{p_A}{p_y} (x_A^S - x_A^D) - \frac{p_F}{p_y} x_F \end{aligned} \quad (28)$$

Le revenu supplémentaire de la taxe est donné par :

$$T = t x_G \quad (29)$$

T est égal à $(t x_G)$ *ex post*. Cependant, pour le consommateur, T est donné.²⁴

Nous caractérisons maintenant les propriétés de l'équilibre lorsqu'un objectif d'incorporation

²⁴Voir Annexe A2 pour les détails concernant la résolution de l'équilibre avec la taxation du gazole.

de biocarburants est utilisé conjointement à une taxe sur le gazole.

3.4 Politique de taxe & incorporation

Nous résolvons cet équilibre de sorte que le gazole soit moins taxé que dans le cas de l'égalité $p_B = p_G + t$. Dans ce cas, nous avons $p_B > p_G + t$, avec une taxe t exogène. La résolution de cet équilibre ressemble à celle d'incorporation obligatoire de biocarburants.

Avec un taux d'incorporation ρ de biocarburants dans les carburants distribués, cette politique implique la satisfaction de la contrainte suivante par le distributeur de carburants :

$$x_B = \rho x_F \iff x_B = \rho(x_G + x_B) \iff x_B = \frac{\rho}{1 - \rho} x_G \iff x_B = \varepsilon x_G \quad (30)$$

A partir des équations $x_F = x_G + x_B$ et $x_B = \varepsilon x_G$, on déduit une relation entre les prix d'énergie :

$$p_F = \frac{1}{1 + \varepsilon} (p_G + t) + \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} p_B \quad (31)$$

Comme le consommateur reçoit le revenu de la taxe, ses demandes de biens sont données par :

$$\begin{aligned} x_A^{DT} &= \left(\frac{p_A}{p_y \theta} \right)^{\frac{1}{\theta-1}} \\ x_F^{DT} &= \left(\frac{p_F}{p_y \varphi} \right)^{\frac{1}{\varphi-1}} \\ y^{DT} &= \frac{w}{p_y} (L_G + L_B + L_y) + \frac{T}{p_y} + \frac{p_A}{p_y} (x_A^S - x_A^D) - \frac{p_F}{p_y} x_F \end{aligned} \quad (32)$$

Le revenu supplémentaire de la taxe est donné par :

$$T = tx_G \tag{33}$$

T est égal à (tx_G) *ex post*. Cependant, pour le consommateur, T est donné.²⁵

Afin de comparer les effets de ces politiques en France, nous devons fournir des valeurs aux paramètres à partir des données françaises que nous présentons dans la section suivante.

4 Résultats Numériques

Nous calibrons les paramètres du modèle d'équilibre général développé dans la section précédente en utilisant des données concernant le biodiesel produit à partir de colza en 2010. Le Tableau I précise les sources des valeurs de référence des paramètres calibrés du modèle tandis que le Tableau 2 fournit les valeurs utilisées. La calibration de ces paramètres est expliquée dans l'Annexe A4.

4.1 Les données françaises

En 2010, la production de biodiesel en France a été de 2 120 000 t, dépassant celle d'éthanol à base de maïs, qui a été de 710 000 t (UFIP reporté par DGEC). Comme la production de biodiesel occupe une place prépondérante en France, nous nous focalisons sur la politique de biodiesel. Nous effectuons les applications numériques à partir des données du colza car ce dernier est la matière première principale pour la production de biodiesel en France. En 2006, près de la moitié des terres cultivées en

²⁵Voir Annexe A3 pour les détails concernant la résolution de l'équilibre avec la politique de taxe & incorporation.

colza a été consacrée à la production de biodiesel, tandis que cette proportion n'était que de 8% dans le cas de tournesol (Guindé et al., 2008).

Tableau I. Source des paramètres calibrés du modèle

Paramètre	Description	Source
p_O	prix du pétrole brut importé	Illinois Oil & Gas Association
p_A	prix du colza	France Agricole
X_A	exportations nettes mensuelles	FranceAgriMer (2015)
\bar{K}	surfaces en colza	FAOSTAT
\bar{L}	emploi salarié et non-salarié	INSEE
μ	productivité du colza (biodiesel)	Sourie et al. (2005) et F.O. Licht
α	élasticité du travail dans l'offre de colza	Agreste (2013), France Agricole, FAOSTAT, INSEE, SOeS
α'	élasticité de la terre dans l'offre de colza	Desbois et Legris (2007), FAOSTAT, France Agricole, SOeS
θ	paramètre de demande de colza	France Agricole, France AgriMer (2015), SOeS
φ	paramètre de demande de carburant	UFIP, DGEC, INSEE
σ_G	coefficient d'émissions de CO ₂ (gazole)	Ademe (2010)
σ_B	coefficient d'émissions de CO ₂ (biodiesel)	Ademe (2010) et De Cara et al. (2012)
d	coût marginal social des émissions de CO ₂	Stern (2007) et Tol (2008)
ρ	taux d'incorporation du biodiesel	Cour des Comptes (2012)
t	taxe sur le gazole	DGEC

Tableau II. Valeurs des paramètres calibrés du modèle

Paramètre	Unité	Valeur
p_O	salaire/tonne	0.163
p_A	salaire/tonne	0.132
\bar{K}	ha	1 463 790
\bar{L}	individus	26 259 400
μ	-	0.323
α	-	0.65
α'	-	0.28
θ	-	0.2854
φ	-	0.5
σ_G	tonne eq.CO ₂ /tonne	4.029
σ_B	tonne eq.CO ₂ /tonne	3.458
d	salaire/tonne eq.CO ₂	0.012
ρ	(%)	5.9
t (taxe & incorporation)	salaire/tonne	0.18714616

4.1.1 Données économiques

La calibration s'est réalisée avec le modèle le plus proche de la réalité, c'est à dire, celui de la politique de taxe sur le gazole avec incorporation de biocarburants. Nous avons calibré les paramètres du modèle à partir des valeurs observées des variables économiques en 2010 quand les données sont disponibles. Cependant, certaines contraintes sur la cohérence du modèle théorique et les résultats de simulations nous ont amenés à poser des valeurs arbitraires pour certains paramètres du modèle. Par exemple, nous posons $\beta = 1$ afin d'avoir le prix de carburant le plus proche possible de la valeur observée en 2010. Les valeurs des paramètres de production a, b, c et e sont choisies de sorte qu'elles impliquent des niveaux du prix du carburant, de demande de colza, de carburant et de bien composite proches de ceux observés en 2010. Nous posons alors $a = 100$, $b = 20$, $c = 10$ et $e = 0.00082$. En ce qui concerne les exportations mensuelles nettes de colza en 2010, nous posons $X_A = 22\,333$ tonnes (FranceAgriMer, 2015). Afin de simuler l'équilibre avec la politique de taxe sur le gazole, nous fixons une valeur exogène aux importations du gazole de sorte qu'elle soit la moins éloignée possible de celle réaliste découlant de la politique de taxe & incorporation dans les simulations assurant une production de biodiesel positive, i.e., $M_O = 1\,700\,000$.

La politique d'incorporation de biocarburants implique que 7% des carburants distribués doivent être des biocarburants à l'horizon de 2010, et ce taux atteint 10% en 2015. Le taux effectivement atteint en 2010 est de $\rho = 6.53\%$ (Cour des Comptes, 2012). C'est ce dernier taux que l'on prend en compte dans nos simulations numériques. Il faut le multiplier par le paramètre d'équivalence énergétique entre diesel et biodiesel, qui est de 0.9. On obtient donc $\rho = 0.059$. Pour l'analyse de sensibilité, nous effectuons également des simulations numériques pour le taux qui

doit être atteint en 2015, i.e., $\rho = 10\%$. En ce qui concerne la politique de taxe & incorporation, la France applique la TICPE (Taxe Intérieure de Consommation sur les Produits Energétiques) sur les volumes consommés de carburant ; et il est égal à $t = 61.58 \text{ €/hl}$ pour le gazole en 2010 (DGEC). Il faut multiplier cette valeur (0.6158 €/l) par la densité du gazole qui est de 0.84 kg/litre , et puis le multiplier par 1000 pour obtenir la taxe par tonne de gazole, ce qui donne 517.272 €/t . Enfin, il faut la diviser par le salaire mensuel brut pour obtenir $t = 0.18714616$ en termes de salaire mensuel.

4.1.2 Données environnementales

Nous détaillons maintenant le calcul des paramètres d'émissions relatifs au raffinage et à la consommation de gazole (σ_G) et ceux relatifs à la production industrielle, au transport et à la distribution du biodiesel, ainsi que ceux relatifs à la production du colza et aux changements d'affectation des sols (σ_B).

L'analyse de cycle de vie effectuée par l'Ademe (2010) pour le biodiesel à base de colza en France montre que la phase de production agricole provoque $28 \text{ g eq.CO}_2/MJ$, la phase de transformation industrielle $7.1 \text{ g eq.CO}_2/MJ$, le transport et la distribution $1.47 \text{ g eq.CO}_2/MJ$. La somme de ces émissions monte à $37.3 \text{ g eq.CO}_2/MJ$. En ce qui concerne les émissions relatives aux changements direct et indirect d'affectation des sols, rappelons qu'en France, l'extension de la culture de colza s'est réalisée sur des terres déjà cultivées. Il n'y a donc pas eu directement d'émissions de GES à cause de changements directs d'affectation des sols. Cependant, la hausse des prix induite par le développement des biocarburants a conduit les autres cultures (comme le tournesol) à s'étendre sur des prairies (Chakir et Vermont, 2013) et ceci a provoqué des émissions de GES dues aux changements indirects d'affectation des sols. Pour fournir une valeur au paramètre σ_B , nous avons retenu l'estimation médiane des

émissions à partir de la méta-analyse réalisée par De Cara et al. (2012), i.e., 54 g eq.CO₂/MJ.²⁶ Si l'on considère cette valeur médiane, la somme des émissions provoquées par l'utilisation du biodiesel est égale à 91.3 g eq.CO₂/MJ. Ceci est équivalent à une valeur de σ_B égale à 3.458 tonne eq.CO₂/tonne. En ce qui concerne les émissions du gazole, l'Ademe (2010) reporte que 1 MJ de gazole cause 91.4 g eq.CO₂. La Commission Européenne quant à elle utilise un facteur d'émissions plus faible pour le gazole, i.e., 83.8 g eq.CO₂/MJ (Directive 2009/28/EC). Nous choisissons d'utiliser ce dernier chiffre étant donné qu'il est pris comme référence dans la méta-analyse de De Cara et al. (2012). Ceci implique une valeur de σ_G égale à 4.029 tonne eq.CO₂/tonne.

Comme la méta-analyse de De Cara et al. (2012) le montre, le biodiesel à base de colza débouche au mieux à de très faibles gains en termes d'émissions de GES par rapport au gazole. Dans ce cas, cette filière de biocarburant ne permettrait pas de respecter le critère de durabilité de 35% fixé par la directive «Energie Renouvelable». En effet, la Commission Européenne avait fixé ces seuils optimistes en l'absence d'information sur les émissions relatives aux changements d'affectation des sols (CAS). L'orientation de la future directive européenne en matière d'énergies renouvelables n'est pas encore définitivement décidée. Le dernier document généré par la procédure est le rapport de seconde lecture du projet de directive par le parlement Européen.²⁷ Ce document demande, d'une part, de limiter la part des biocarburants conventionnels dans la consommation d'énergies à 6%. Il demande, d'autre part, à ce que les facteurs de changements indirects d'affectation des sols (*ILUC factors*) soient sérieusement envisagés. Le document demande également de préciser la définition du concept de « *low-ILUC risk biofuel* ». Notre analyse se situe donc dans la tendance

²⁶La méta-analyse de De Cara et al. (2012) est effectuée sur un total de 71 références fournissant 239 évaluations des émissions de GES dues aux changements directs d'affectation des sols, et 561 évaluations des émissions de GES dues aux changements indirects d'affectation des sols.

²⁷<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+REPORT+A8-2015-0025+0+DOC+PDF+V0//EN>

actuelle, à savoir la non-prise en compte des émissions CAS ou leur prise en compte uniquement à titre d'information. Il est important de noter que le colza serait probablement exclu des quotas d'incorporation si un inversement de situation vers une prise en compte des émissions de CAS se produisait.

Par ailleurs, des travaux récents (Dumortier et al. (2011), Broch et al. (2013) et Gohin (2014)) ont mis en évidence la sensibilité des changements d'affectation des sols aux choix de calibrage de l'élasticité du rendement au prix agricole. En effet, l'impact d'une hausse du prix de colza pourrait se traduire davantage par une augmentation des rendements que par l'expansion des terres. Gohin (2014) met en lumière que la plupart des modèles calibrés utilisent des élasticités-prix des rendements nettement inférieurs aux élasticités-prix des surfaces. C'est la raison pour laquelle Gohin (2013) propose d'utiliser pour l'Europe une élasticité-prix du rendement (pour les graines oléagineuses) de 3.15, tandis que l'élasticité introduite dans le modèle MIRAGE-BIOF (utilisé par la Commission Européenne) est de 0.84. Ces résultats montreraient que les émissions liées aux CAS du biodiesel sont souvent surestimées dans les modèles. L'ensemble des études citées ci-dessus témoignent que le débat reste ouvert sur le bilan de GES des biocarburants de première-génération. C'est la raison pour laquelle nous considérons plusieurs valeurs du paramètre σ_B .

Nous allons maintenant discuter de la valeur des dommages marginaux dus aux émissions de GES. Le travail de Stern (2007) indique une valeur de $\$80/tCO_2$, tandis que la valeur médiane de l'étude de Tol (2008) est de $\$33/tCO_2$. Ce sont des estimations des dommages marginaux au niveau mondial. Cui et al. (2011) utilisent une estimation des dommages marginaux uniquement pour les États-Unis de l'ordre de $\$20/tCO_2$. Ils font également une analyse de sensibilité pour une valeur basse de $\$5/tCO_2$. L'administration Obama aux États-Unis a réévalué son estimation du coût social du carbone pour l'année 2020 avec un taux d'actualisation de

3%, de \$26/tCO₂ à \$43/tCO₂ (Ministère des Affaires Etrangères et du Développement International). Ces différentes estimations se situent donc dans l'intervalle [3.5466€/tCO₂, 56.7456€/tCO₂]. En termes de salaires, ces estimations se situent dans l'intervalle [0.0013 salaire/tCO₂, 0.02 salaire/tCO₂]. Par exemple, l'estimation de l'Administration Obama représente une valeur de 0.012 salaire/tCO₂. Nous considérons d'abord cette valeur intermédiaire dans nos simulations, pour ensuite effectuer des analyses de sensibilité sur les valeurs extrêmes de la distribution des dommages marginaux.

4.2 Résultats

Nous présentons, tout d'abord, les résultats simulés à l'équilibre lorsqu'un objectif d'incorporation de biocarburants est utilisé conjointement à une taxe sur le gazole (politique de taxe & incorporation). Comme ces deux instruments étaient utilisés simultanément en 2010, cette politique reflète davantage la situation observée en 2010 que les autres scénarii de politiques.

Tableaux III. Les résultats de la politique taxe & incorporation

p_G	p_B	p_y	p_F	τ	x_F	x_A^D	y^D	x_G	T
0.173	0.459	1219	0.366	0.015	2 776 065	61 289	21 116	2 612 278	488 877
x_B	\tilde{x}_A	x_A^S	$x_O = M_O$	Y	y^S				
163 787	507 240	590 862	2 612 278	346	21 463				
L_A	L_B	L_G	L_y						
50 696	8 189	26 122	26 174 392						

Unités : p_G, p_B, p_y, p_F et τ en salaire mensuel brut en 2010 par tonne ; $x_F, x_A^D, y^D, x_G, x_O, M_O, x_B, \tilde{x}_A, Y, x_A^S, y^S$ en tonnes ; T en salaire ; L_G, L_B, L_A, L_y en nombre d'individus.

Le prix simulé du carburant par tonne, qui est égal à 0.366, est proche de sa valeur observée en 2010, i.e., 0.349 (c.à.d. 963.23 euros/tonne, ou encore 1.147 euros/hl). Le prix simulé de la terre par tonne, qui est égal à 0.015 en termes de salaire, est comparable à sa valeur mensuelle observée en 2010, i.e., 0.014 (c.à.d. 39.75 euros/ha en valeur mensuelle). La valeur simulée de la consommation de carburant est égale à 2 776 065 tonnes. Cette valeur est presque identique à sa valeur mensuelle moyenne observée en 2010, soit 2 800 000 tonnes. La consommation alimentaire de colza est égale à 61 289 tonnes dans nos simulations. Ce chiffre est également très proche de la valeur découlant de nos calculs personnels (voir Annexe A4) à partir des données réelles, i.e., 61 270 tonnes en valeur mensuelle moyenne. La consommation de gazole qui est égale à 2 612 278 tonnes est proche de sa valeur mensuelle moyenne en 2010, qui était de l'ordre de 2 800 000. La production de biodiesel est égale à 163 787 tonnes dans les simulations. Ce chiffre est très proche de sa valeur mensuelle moyenne observée en 2010, 174 166 tonnes. De même, les valeurs des variables \tilde{x}_A et x_A^S sont proches de leurs valeurs mensuelles découlant de nos calculs personnels (voir Annexe A4) à partir des données réelles, i.e., 473 756 et 557 360 respectivement. L'emploi dans le secteur de gazole simulé, 26 122 individus, est compris entre le chiffre fourni par l'UFIP qui est de l'ordre de 37 500 individus (emploi direct et indirect) et celui qui est fourni par l'INSEE qui est de l'ordre de 11 103 individus (emploi dans le raffinage et cokéfaction). L'emploi simulé dans le secteur agricole pour la production du colza, 50 696 individus, est proche de sa valeur découlant de nos calculs personnels (voir Annexe A4) à partir des données réelles, i.e., 48 315. L'emploi dans le secteur de biodiesel, 8189 individus, est très proche de sa valeur rapportée par PriceWaterCoopers en 2010, i.e., 8900 individus.

Nous allons maintenant commenter les effets de toutes les politiques sur les variables considérées successivement. Nous commençons par les effets sur les prix, puis

sur les quantités et les émissions pour terminer par les effets sur le bien-être.

Tableau IV. Les résultats des politiques : **prix** (en termes de salaire/tonne)

	p_G	p_B	p_y	p_F	τ
Taxe & incorporation	0.173	0.459	1219	0.366	0.015
Taxe gazole	0.173	0.459	1219	0.459	0.007
Incorporation biodiesel	0.173	0.459	1219	0.190	0.050
Solution de laissez-faire	0.173	—	1219	0.173	0.002

Comme les résultats présentés sur le Tableau IV le mettent en évidence, les niveaux du prix du gazole p_G , du prix de biocarburant p_B et du bien composite p_y sont égaux dans tous les cas étudiés car ces niveaux ne dépendent que des paramètres exogènes du modèle. Le prix du carburant p_F est le plus faible à l'équilibre décentralisé, suivi par ordre croissant de la politique d'incorporation de biodiesel, de la politique de taxe & incorporation, et enfin de la politique de taxe du gazole. A l'équilibre décentralisé, le carburant est peu coûteux car le biocarburant est absent dans ce cas. Dans le cas de la politique d'incorporation de biodiesel, le prix du carburant est faible car le gazole n'est pas taxé. A la politique de taxe du gazole, le prix du biocarburant est exactement égal au prix du gazole taxé, le niveau de la taxe endogène étant $t = p_B - p_G = 0.459 - 0.173 = 0.286$. Le carburant est alors coûteux. Le classement (dans l'ordre croissant) des prix de la terre τ pour chaque arrangement institutionnel est le suivant : la solution de laissez-faire, la politique de taxe du gazole, la politique de taxe & incorporation, et la politique d'incorporation de biodiesel. En effet, le prix de la terre dépend positivement de la quantité produite du colza sur le marché x_A^S . Or, l'offre du colza est la plus élevée à la politique d'incorporation de biodiesel.

Tableaux V. Les résultats des politiques : **quantités** (tonne) et **emplois** (individu)

	x_A^D	x_F	y^D	x_G	$x_O = M_O$
Taxe & incorporation	61 289	2.8 10 ⁶	21 116	2.6 10 ⁶	2.6 10 ⁶
Taxe gazole	61 289	1.8 10 ⁶	21 270	1.7 10 ⁶	1.7 10 ⁶
Incorporation biodiesel	61 289	10 10 ⁶	19 994	9.7 10 ⁶	9.7 10 ⁶
Solution de laissez-faire	61 289	12 10 ⁶	19 766	12 10 ⁶	12 10 ⁶

	x_B	\tilde{x}_A	Y	x_A^S	y^S
Taxe & incorporation	163 787	507 240	346	590 862	21 463
Taxe gazole	66 340	205 451	224	289 074	21 495
Incorporation biodiesel	608 539	1.9 10 ⁶	1294	1 968 228	21 289
Solution de laissez-faire	-	-	1658	83 622	21 424

	L_A	L_B	L_G	L_y	$L_y - L_y(\text{laissez-faire})$
Taxe & incorporation	50 696	8 189	26 122	26 174 392	46 395
Taxe gazole	24 802	3 317	17 000	26 214 280	86 283
Incorporation biodiesel	168 873	30 426	97 056	25 963 042	-164 955
Solution de laissez-faire	7 174	-	124 228	26 127 997	0

En ce qui concerne les quantités (Tableaux V), nous notons tout d'abord que la demande alimentaire de colza x_A^D est identique dans tous les cas étudiés. La demande alimentaire de colza, qui est donnée par $x_A^D = \left(\frac{p_A}{p_y \theta}\right)^{\frac{1}{\theta-1}}$, dépend entre autres de p_A et p_y qui sont identiques pour tous les arrangements institutionnels. La demande de carburant par le consommateur x_F et la production de gazole x_G sont les plus élevées à la solution de laissez-faire car l'offre de carburant est satisfaite uniquement avec le gazole dont le prix est relativement faible. La production de biodiesel x_B est la plus élevée pour la politique d'incorporation de biodiesel car à cette politique,

l'offre de biodiesel est une part constante de la demande de carburant, la part étant déterminée par le taux d'incorporation. Or la demande de carburant est élevée pour cette politique du fait du prix faible du carburant. Nous notons également que la demande du bien composite est la plus élevée dans le cas de la politique de taxe du gazole, même si les niveaux sont assez proches entre politiques.

En ce qui concerne les effets des différentes politiques (par rapport à la solution de laissez-faire) sur l'allocation de l'emploi entre les différents secteurs, nous notons tout d'abord que la politique d'incorporation de biodiesel est la seule qui crée des emplois dans les secteurs agricole et énergétique, i.e., $L_A + L_B + L_G = \bar{L} - L_y$. Pour vérifier ce constat, il suffit d'observer les chiffres dans la dernière colonne du Tableau V portant sur l'emploi. En termes de création d'emplois dans les secteurs hors celui du bien composite, la politique de taxe du gazole est la moins favorable car elle détruit beaucoup d'emplois dans ces secteurs. En effet, les niveaux d'emploi dépendent positivement de l'offre dans le secteur concerné. Or, à la politique d'incorporation de biodiesel, l'offre de carburant est plus élevée que celle découlant des autres politiques car le prix du carburant est relativement faible à cause de l'absence de taxe. Ceci conduit également à un niveau relativement élevé de l'offre de biodiesel (la production de biodiesel étant déterminée par le taux d'incorporation) et donc de l'offre de colza.

L'offre de colza est la plus élevée pour la politique d'incorporation de biodiesel suivie par les offres de colza pour la politique de taxe & incorporation, la politique de taxe du gazole, et la solution de laissez-faire. En effet, l'offre du colza découle de la somme de la demande alimentaire, des exportations nettes et de la demande en matière première agricole. Les deux premières demandes sont identiques entre politiques. Par conséquent, la différence de niveau de production de colza entre politiques dépend de la production de biodiesel *in fine*, qui est la plus élevée pour la politique d'incorporation de biodiesel.

Une autre question est d’analyser les implications des différents arrangements institutionnels en termes de la consommation totale de carburant, ($x_F = x_G + x_B$). Ceci nous permettrait de comprendre si les consommateurs utilisent moins de carburants suite à la mise en place des mesures de promotion des biocarburants.²⁸ Les simulations numériques montrent que la consommation totale de carburants diminue pour toutes les politiques énergétiques par rapport à la solution de laissez-faire, grâce à la hausse du prix des carburants induite par ces politiques. Cette réduction est néanmoins assez modeste pour la politique d’incorporation de biodiesel. Elle est la plus élevée dans le cas de la politique de taxe du gazole car le prix du carburant est le plus élevé dans ce cas.

Le Tableau VI résume les résultats des différents arrangements institutionnels en termes d’émissions de GES et de bien-être.

Table VI. Les résultats des politiques : **émissions** (tonne eq.CO₂) **et bien-être** (salaire mensuel brut)

	EM_G	EM_B	E	utilité
Taxe & incorporation	10 524 867	566 378	11 091 245	-110 289
Taxe gazole	6 849 300	229 405	7 078 705	-62 321
Incorporation biodiesel	39 104 203	2 104 328	41 208 532	-471 272
Solution de laissez-faire	50 051 530	-	50 051 530	-577 303

En termes de bien-être, toutes les politiques sont meilleures que la solution de laissez-faire. Le niveau élevé du bien-être par rapport à l’équilibre décentralisé provient de la réduction des émissions de GES obtenue grâce à la réduction de la consommation du gazole. L’économie en termes d’émissions de GES atteinte par chaque politique,

²⁸Khanna et al. (2008), et de Gorter and Just (2009b) ont souligné les effets inattendus d’une politique de défiscalisation aux biocarburants et d’une politique de consommation minimale de biocarburants dans un modèle où le prix de l’essence est endogène. Dans ce cas, les deux politiques peuvent augmenter la consommation totale de carburants à cause de la chute du prix des carburants.

par rapport aux émissions à la solution de laissez-faire, est de 86%, 78%, et 18% respectivement pour les politiques de taxe du gazole, de taxe & incorporation et enfin d'incorporation de biodiesel.

Le classement (dans l'ordre décroissant) des arrangements institutionnels, en termes de bien-être est le suivant : la politique de taxe du gazole, la politique de taxe & incorporation, la politique d'incorporation de biodiesel, et la solution de laissez-faire. La politique de taxe du gazole et la mise en place simultanée d'une taxe sur le gazole et d'un objectif d'incorporation de biodiesel améliorent dans une large mesure le bien-être du consommateur. Ces politiques permettent de réduire significativement la consommation du gazole, ce qui atténue les émissions de GES et les dommages environnementaux associés. Il s'avère que la politique de taxe sur le gazole est le meilleur arrangement institutionnel en termes de bien-être.²⁹ Cette politique permet des réductions importantes en émissions de GES associé à un effet revenu positif. En effet, la politique de taxe sur le gazole permet d'atténuer les dommages environnementaux dans une large mesure grâce à des économies significatives en GES (de l'ordre de 86%).

Nos résultats provenant de l'expérience française montrent que les effets positifs liés à la taxe (diminution de la consommation du gazole polluant et effet revenu positif via la redistribution) dominant, en termes de bien-être, les effets désirés nets de l'intégration des biocarburants (diminution de la consommation du gazole polluant, malgré les émissions additionnelles provenant des changements d'affectation des sols et ce, malgré le conflit d'usage du bien agricole).

²⁹Des résultats similaires ont été obtenus avec une fonction d'utilité Cobb-Douglas, dont les effets de substitution et de revenu sont différentes, et une fonction de distribution de l'énergie Cobb-Douglas dans la version précédente de cet article.

4.3 Analyse de sensibilité des résultats

Dans cette partie, nous conduisons une analyse de sensibilité des résultats aux valeurs des différents paramètres du modèle.

Nous modifions tout d'abord les paramètres de la fonction de production du colza dont les évaluations empiriques sont difficiles à obtenir. Nous conduisons nos simulations pour des valeurs alternatives du paramètre α' , i.e., 0.2 et 0.4. De la même manière, nous effectuons des simulations pour d'autres valeurs du paramètre du travail α , i.e., 0.5, 0.6 et 0.7.

Nous testons également la robustesse des résultats à la valeur des importations M_O qui doit être introduite comme une exogène dans le cas de la politique de taxe du gazole. Nous prenons deux valeurs alternatives, $M_O = 1\,600\,000$ et $M_O = 1\,750\,000$, à la place de 1 700 000.

Nous effectuons également une analyse de sensibilité concernant la valeur du paramètre μ qui représente la productivité du colza pour la production de biodiesel. Nous considérons maintenant une productivité plus élevée, de l'ordre de 0.37, à la place de 0.323.

En ce qui concerne l'objectif d'incorporation de biodiesel, nous utilisons alternativement le taux d'incorporation décidé pour l'année 2015, qui est égal à 10%. Il faut le multiplier par le paramètre d'équivalence énergétique entre diesel et biodiesel, qui est de 0.9. On obtient donc $\rho = 0.9$.

Nous modifions également le paramètre d'émissions provenant de l'utilisation du biodiesel σ_B afin d'analyser ses implications sur les résultats du modèle. Dans un premier temps, nous prenons un paramètre d'émissions plus faible $\sigma_B = 1.412$ tonne eq.CO₂/tonne. Cette estimation correspond à la prise en compte uniquement des émissions provenant d'une analyse de cycle de vie classique (Ademe, 2010), en nég-

ligeant les émissions dues aux CAS (37.3 g eq.CO₂/MJ). Dans un second temps, nous considérons un paramètre d'émissions plus élevé, $\sigma_B = 5.681$ tonne eq.CO₂/tonne, qui correspond à un scénario volontairement plus pessimiste.

En ce qui concerne la valeur du paramètre de dommages d , nous mettons en place deux jeux de simulations. Dans un premier temps, nous choisissons une valeur faible du paramètre $d = 0.0013$ salaire/ tCO_2 , qui correspond à une estimation de \$5/ tCO_2 . Dans un second temps, nous optons pour une valeur haute $d = 0.02$ salaire/ tCO_2 en termes de salaire, qui correspond à l'évaluation de Stern (2007) du coût social global du changement climatique, qui est de l'ordre de \$80/ tCO_2 .

Enfin, nous avons voulu tester la robustesse de nos résultats numériques à la prise en compte d'une autre année de référence, 2009. L'intérêt de comparer les résultats des simulations pour les années 2009 et 2010 vient de la hausse significative du prix du pétrole brut, passant de \$53.56/baril en 2009 à \$71.21/baril en 2010. En 2009, d'autres paramètres changent également de valeur. Le salaire mensuel brut est égal à 2708 euros. Le prix du colza est égal à 281.54, celui du pétrole brut importé est de 338.47. Ces prix en termes de salaire sont égaux à $p_A = 0.104$ et $p_O = 0.125$. L'emploi total dans l'économie est donné par 25 691 000 individus. Le taux d'incorporation de biocarburants effectivement atteint en 2009 est égal à 6.25%. Sa valeur corrigée en termes énergétiques est égale à $\rho = 0.056$. Enfin, la taxe TICPE sur les volumes consommés de carburant est égale à $t = 59.22$ €/hl pour le gazole en 2009. Cette taxe est égale à $t = 0.18369645$ en termes de salaire.

Nous notons que tous ces changements n'affectent ni les effets des différentes politiques par rapport au résultat de la solution de laissez-faire, ni le classement des différentes politiques entre elles. Tout d'abord, la solution de laissez-faire est toujours la plus mauvaise en termes de bien-être. Ensuite, l'objectif d'incorporation de biodiesel est toujours la politique la moins préférable, en termes de bien-être,

quelles que soient les valeurs des paramètres. Enfin, dans tous ces cas, la politique de taxe du gazole domine, en termes de bien-être, les politiques énergétiques associées à une mesure d'incorporation de biocarburants.

Enfin, nous effectuons une autre analyse de sensibilité qui concerne la valeur du prix de colza. Nous retenons pour cet exemple $p_A = 200$ €/tonne qui correspond au prix de colza observé en 2000. Ce niveau est équivalent à $p_A = 0.072$ en termes de salaire, qui reste inférieur aux prix observés en 2009 et en 2010. Dans ce cas, la solution de laissez-faire est toujours la plus mauvaise en termes de bien-être. Cependant, le classement des politiques, en termes de bien-être économique, change en faveur de la politique de taxe & incorporation. La politique de taxe du gazole n'est plus la meilleure politique car le taux de taxe requis pour égaliser le prix du gazole avec taxe au prix de biocarburant n'est pas assez élevé. Ceci provient du fait que le prix de biocarburant est plus faible ici grâce à des coûts de production réduits. Le taux de taxe n'est donc pas assez incitatif dans ce cas de figure, et ne permet pas de réduction importante en émissions de GES.

5 Conclusion

Dans ce travail, nous avons effectué une évaluation des effets économiques et environnementaux d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants actuellement utilisée en France. Cette politique d'incorporation obligatoire de biocarburants est comparée à une politique française de taxation du carburant fossile et à la solution de laissez-faire (l'absence de biocarburant comme source d'énergie). Nous avons également évalué les effets d'interaction d'une politique d'incorporation obligatoire de biocarburants lorsqu'elle est utilisée conjointement avec une taxe sur le carburant fossile. Des politiques énergétiques non-nécessairement optimales, inspirées du cas

français sont évaluées à l'aide d'un modèle d'équilibre général qui prend en compte les externalités dues aux émissions de GES.

En utilisant les données françaises de biodiesel à base de colza pour 2010, nos résultats numériques indiquent d'une part que ces politiques permettent d'améliorer le bien-être des agents par rapport à la solution de laissez-faire, grâce à des réductions en émissions de GES, et d'autre part, que l'objectif d'incorporation de biodiesel est la politique la moins souhaitable, en termes de bien-être, quelles que soient les valeurs des paramètres. Enfin, la politique de taxe du gazole domine, en termes de bien-être, les politiques énergétiques associées à une mesure d'incorporation de biocarburants. Cette politique permet des réductions importantes en émissions de GES en même temps que l'obtention d'un effet revenu positif. Remarquons toutefois que si le prix du colza en 2010 avait été suffisamment bas, alors une combinaison de taxe du gazole avec une incorporation obligatoire de biocarburants aurait été préférable à une taxe.

Il est important de noter que notre analyse d'efficacité est fondée sur la comparaison des instruments économiques sous-optimaux. Le choix du niveau de chaque instrument, la taxe sur le gazole ou le taux d'incorporation de biocarburants, ne découle pas d'un programme de maximisation contrairement à l'approche adoptée par Lapan et Moschini (2012). Nous comparons essentiellement des instruments de politique énergétique non-nécessairement optimaux inspirés de l'expérience française, notre objectif étant d'évaluer l'efficacité d'une mesure d'incorporation de biocarburants telle que celle toujours à l'œuvre en France.

References

- [1] [Ademe] (2010) : *Analyses de cycle de vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France*, Rapport Final, Février 2010, Direction Production et Energies Durables (DEPD) - ADEME.
- [2] [Ademe] (2012) : *Analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux (productions agricoles, produits transformés et coproduits) et les changements d'affectation des sols*, Février 2012.
- [3] [Agreste] (2013) : *Le bilan annuel de l'emploi agricole, résultats 2011*, Chiffres et Données Agriculture, Numéro 220, juin 2013.
- [4] **Babcock, B.A.** (2008) : *Distributional implications of U.S. ethanol policy*, Review of Agricultural Economics, Vol. 30, 533-542.
- [5] **Bernard, F., Prieur, A.** (2007) : *Biofuel market and carbon modeling to analyse French biofuel policy*, Energy Policy, 35, 5991-6002.
- [6] **Bourgeon, J.M., Treguer, D.** (2010) : *Killing two birds with one stone : US and EU biofuel programmes*, European Review of Agricultural Economics, Vol. 37 (3), 369-394.
- [7] **Broch, A., Hoekman, S.K., Unnasch, S.** (2013) : *A review of variability in indirect land use change assessment and modeling in biofuel policy*, Environmental Science and Policy, vol.29 (May), 147-57.
- [8] **Busse, S., Brümmer, B., Ihle, R.** (2010) : *Investigating rapeseed price volatilities in the course of the food crisis*, Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus eV Band, vol. 46, 275-287.

- [9] **Busse,S., Brümmer,B., Ihle,R.** (2012) : *Price formation in the German biodiesel supply chain : a Markov-switching vector error correction modeling approach*, Agricultural Economics, vol. 43, 545–560.
- [10] **De Cara, S., Gabrielle, B., Goussebaille, A., Grateau, R., Levert, F., Quemener, J.** (2012) : *Revue critique des études évaluant l’effet des changements d’affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants*, Étude réalisée pour le compte de l’ADEME, Rapport final, INRA UMR Economie Publique, Grignon, France, 69~pp.
- [11] **Chakir, R., 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*, Etude financée par l’ADEME. Rapport final, INRA UMR Economie Publique, Grignon, France, 96~pp.
- [12] [**Cour des Comptes**] (2012) : *La Politique d’Aide aux Biocarburants*, Rapport public thématique, Evaluation d’une politique publique, Janvier 2012.
- [13] [**Cour des Comptes**] (2013) : *La mise en œuvre par la France du Paquet énergie-climat*, Décembre 2013.
- [14] **Cui, J., Lapan, H., Moschini, G., Cooper, J.** (2011) : *Welfare impacts of alternative biofuel policies and energy policies*, American Journal of Agricultural Economics, Vol. 93 (5), 1235-1256.
- [15] **Desbois, D., Legris, B.** (2007) : *Prix et coûts de production de six grandes cultures : blé, maïs, colza, tournesol, betterave et pomme de terre*, L’agriculture Nouveaux Défis, INSEE, 65–78.

- [16] **Directive 2003/96/CE** du conseil du 27 octobre 2003 restructurant le cadre communautaire de taxation des produits énergétiques et de l'électricité.
- [17] **Directive 2009/28/CE** du 23/04/09 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE.
- [18] **Directive 2009/29/CE** du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 modifiant la directive 2003/87/CE afin d'améliorer et d'étendre le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre.
- [19] **Directive 2009/30/CE** du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 modifiant la directive 98/70/CE en ce qui concerne les spécifications relatives à l'essence, au carburant diesel et aux gazoles ainsi que l'introduction d'un mécanisme permettant de surveiller et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, modifiant la directive 1999/32/CE du Conseil en ce qui concerne les spécifications relatives aux carburants utilisés par les bateaux de navigation intérieure et abrogeant la directive 93/12/CEE.
- [20] **Du, X., Hayes, D.J., Mallory, M.L.** (2009) : *A welfare analysis of the U.S. ethanol subsidy*, Review of Agricultural Economics, Vol. 31 (4), 669-676.
- [21] **Dumortier, J., Hayes, D., Carriquiry, M., Dong, F., Du, X., Elobeid, A., Fabiosa, J.F., Tokgoz, S.** (2011) : *Sensitivity of carbon emission estimates from indirect land-use change*, Applied Economic Perspectives and Policy, vol. 33 (3), 428-48.
- [22] **Elobeid, A., Tokgoz, S.** (2008) : *Removing distortions in the U.S. ethanol market : what does it imply for the United States and Brazil?*, American Journal of Agricultural Economics, Vol. 90 (4), 918-932.

- [23] [France Agricole] (2010) : *Colza, Rendements et production en baisse*, 24 décembre 2010.
- [24] [FranceAgriMer] (2015) : *Marché des oléo-protéagineux*, Statistiques de février 2015.
- [25] **Gardner, B.** (2007) : *Fuel ethanol subsidies and farm price support*, Journal of Agricultural & Food Industrial Organization, Special Issue : Explorations in Biofuels Economics, Policy, and History, Vol.5, Article 4.
- [26] **de Gorter, H., Just, D. R.** (2009a) : *The welfare economics of a biofuel tax credit and the interaction effects with price contingent farm subsidies*, American Journal of Agricultural Economics, Vol. 91 (2), 477-488.
- [27] **de Gorter, H., Just, D. R.** (2009b) : *The economics of a blend mandate for biofuels*, American Journal of Agricultural Economics, Vol. 91 (3), 738-750.
- [28] **de Gorter, H., Just, D. R.** (2010) : *The social costs and benefits of biofuels : the intersection of environmental, energy and agricultural policy*, Applied Economic Perspectives and Policy, Vol. 32 (1), 4-32.
- [29] **Gohin, A.** (2013) : *Le changement d'affectation des sols induit par la consommation européenne de biodiesel : une analyse de sensibilité aux évolutions des rendements agricoles*, Working Paper SMART – LERECO N°13-07, juin 2013.
- [30] **Gohin, A.** (2014) : *Assessing the land use changes and greenhouse gas emissions of biofuels : elucidating the crop yield effects*, Land Economics, Vol. 90 (4), 575–586.

- [31] **Guindé, L., Jacquet, F., Millet, G.** (2008) : *Impacts du développement des biocarburants sur la production française de grandes cultures*, Review of Agricultural and Environmental Studies, Vol. 89 (4), 55-81.
- [32] **[JRC]** (2008a) : *Biofuels Versus Diesel and Gasoline in the JEC-WTW report version 2c, An Extract from the 'Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context*, ver. 2c March 2007, by JRC, Eucar and Concawe (<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/10445>).
- [33] **[JRC]** (2008b) : *Biofuels in the European context : facts and uncertainties*, European Commission.
- [34] **Khanna, M., Ando, A.W., Taheripour, F.** (2008) : *Welfare effects and unintended consequences of biofuel subsidies*, Applied Economic Perspectives and Policy, Vol. 30(3), 411-421.
- [35] **Lapan, H., Moschini, G.** (2012) : *Second-best biofuel policies and the welfare effects of quantity mandates and subsidies*, Journal of Environmental Economics and Management, Vol. 63, 224-241.
- [36] **Mallory, M., Hayes, D.J., Babcock, B.A.** (2011) : *Crop-based biofuel production with acreage competition and uncertainty*, Land Economics, Vol. 87 (4), 610-627.
- [37] **Martinez-Gonzalez, A., Sheldon, I.M., Thompson, S.** (2007) : *Estimating the welfare effect of U.S. distortions in the ethanol market using a partial equilibrium trade model*, Journal of Agricultural & Food Industrial Organization, vol. 5, article 5, 1-17.

- [38] **Ryan, L., Convery, F., Ferreira, S.** (2006) : *Stimulating the use of biofuels in the European Union : implications for climate change policy*, Energy Policy, Vol. 34, 3184-3194.
- [39] **Rozakis, S., Sourie, J.-C.** (2005) : *Micro-economic modeling of biofuel system in France to determine tax exemption policy under uncertainty*, Energy Policy, 33, 171-182.
- [40] **Schmitz, A., Moss, C.B., Schmitz, T.G.** (2007) : *Ethanol : no free lunch*, Journal of Agricultural & Food Industrial Organization 5, Iss. 2, Article 3.
- [41] **Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., Yu, T-H.** (2008) : *Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change*, Science, Vol. 319, no. 5867, 1238-1240.
- [42] **Sourie, J-C., Tréguer, D., Rozakis, S.** (2005) : *L'ambivalence des filières biocarburants*, INRA Sciences Sociales, Recherches en Economie et Sociologie Rurales, No.2, Décembre.
- [43] **Stern, N. H.** (2007) : *The Economics of Climate Change. The Stern Review.* Cambridge, UK : University Press.
- [44] **Tol, R. S. J.** (2008) : *The social cost of carbon : trends, outliers and catastrophes, economics.* The Open-Access, Open- Assessment E-Journal, Vol. 2(25), 1-24.

ANNEXE

A1- Objectif d'incorporation de biocarburants

Les relations d'équilibres sur les différents marchés sont :

$$\text{Carburant : } x_F^S = x_F^D \Leftrightarrow (1+\varepsilon)x_G = (1+\varepsilon)\beta x_O = (1+\varepsilon)aL_G = \frac{(1+\varepsilon)}{\varepsilon}x_B = \left(\frac{p_F}{p_y\varphi}\right)^{\frac{1}{\varphi-1}} \quad (34)$$

$$\text{Gazole : } x_G^S = x_G^D \Leftrightarrow \beta x_O = aL_G = \frac{1}{1+\varepsilon}x_F \quad (35)$$

$$\text{Biocarburant : } x_B^S = x_B^D \Leftrightarrow \mu\tilde{x}_A = bL_B = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}x_F \quad (36)$$

$$\text{Colza : } x_A^S = x_A^D + \tilde{x}_A + X_A \Leftrightarrow cL_A^{\alpha+\alpha'} \left(\frac{w}{\tau} \frac{\alpha'}{\alpha}\right)^{\alpha'} = \left(\frac{p_A}{p_y\theta}\right)^{\frac{1}{\theta-1}} + \frac{bL_B}{\mu} + X_A \quad (37)$$

$$\text{Pétrole : } M_O = x_O \Leftrightarrow M_O = \frac{x_G}{\beta} = \frac{aL_G}{\beta} \quad (38)$$

$$\text{Bien composite : } y^S = y^D + Y \Leftrightarrow eL_y = \left[\frac{w}{p_y}(L_G + L_B + L_y) + \frac{p_A}{p_y}\left(X_A + \frac{bL_B}{\mu}\right) - \frac{p_F}{p_y}x_F \right] + Y \quad (39)$$

$$\text{Travail : } \bar{L} = L_y + L_A + L_B + L_G \Leftrightarrow \bar{L} = \left[\frac{y^D + Y}{e} \right] + \left[\frac{\alpha p_A x_A^S}{w} \right] + \left(\frac{1}{a} + \frac{\varepsilon}{b} \right) x_G \quad (40)$$

$$\text{Terre : } \bar{K} = \frac{\alpha' p_A x_A^S}{\tau} \quad (41)$$

$$\text{Balance commerciale : } p_A X_A + p_y Y = p_O M_O = p_O x_O \quad (42)$$

Les variables exogènes du modèle sont : ε , p_A , p_O , $w = 1$, \bar{L} , \bar{K} et X_A . En utilisant les valeurs de ces variables exogènes et d'autres paramètres, il est possible d'obtenir les expressions des variables endogènes du modèle en résolvant le système d'équations suivant : Equations 3, 6, 7, 8, 10, 11, 22 et 23, et les sept relations d'équilibre décrites ci-dessus. Le niveau des émissions à l'équilibre est simplement $EM^* = \sigma_G \times x_G^* + \sigma_B \times x_B^*$. Cette dernière expression avec les demandes des biens déterminent l'utilité à l'équilibre : $U^* = y^* + x_A^{*\theta} + x_F^{*\varphi} - d \times EM^*$.

A2- Taxe sur le gazole

Les relations d'équilibres sur les différents marchés sont :

$$\text{Carburant : } x_F^S = x_F^D \Leftrightarrow \beta x_O + \mu \tilde{x}_A = \left(\frac{p_F}{p_y \varphi} \right)^{\frac{1}{\varphi-1}} \quad (43)$$

$$\text{Gazole : } x_G^S = x_G^D \Leftrightarrow \beta x_O = a L_G = x_G^D \quad (44)$$

$$\text{Biocarburant : } x_B^S = x_B^D \Leftrightarrow \mu \tilde{x}_A = b L_B = x_B^D = x_F - x_G^S \quad (45)$$

$$\text{Colza : } x_A^S = x_A^D + \tilde{x}_A + X_A \Leftrightarrow c L_A^{\alpha+\alpha'} \left(\frac{w \alpha'}{\tau \alpha} \right)^{\alpha'} = \left(\frac{p_A}{p_y \theta} \right)^{\frac{1}{\theta-1}} + \frac{b L_B}{\mu} + X_A \quad (46)$$

$$\text{Pétrole : } M_O = x_O \Leftrightarrow M_O = \frac{x_G}{\beta} = \frac{aL_G}{\beta} \quad (47)$$

$$\text{Bien composite : } y^S = y^D + Y \Leftrightarrow eL_y = \left[\frac{w}{p_y}(L_G + L_B + L_y) + \frac{taL_G}{p_y} + \frac{p_A}{p_y} \left(X_A + \frac{bL_B}{\mu} \right) - \frac{p_F}{p_y} x_F \right] + Y \quad (48)$$

$$\text{Travail : } \bar{L} = L_y + L_A + L_B + L_G \Leftrightarrow \bar{L} = \left[\frac{y^D + Y}{e} \right] + \left[\frac{\alpha p_A x_A^S}{w} \right] + \frac{x_B}{b} + \frac{x_G}{a} \quad (49)$$

$$\text{Terre : } \bar{K} = \frac{\alpha p_A x_A^S}{\tau} \quad (50)$$

$$\text{Balance commerciale : } p_A X_A + p_y Y = p_O M_O = p_O x_O \quad (51)$$

Les variables exogènes du modèle sont : M_O , p_A , p_O , $w = 1$, \bar{L} , \bar{K} , et X_A . En utilisant les valeurs de ces variables exogènes et d'autres paramètres, il est possible d'obtenir les expressions des variables endogènes du modèle en résolvant le système d'équations suivant : Equations 3, 6, 7, 8, 10, 11, 13, 24, 25, 27, et les sept relations d'équilibre décrites ci-dessus. Le niveau des émissions à l'équilibre est simplement $EM^* = \sigma_G \times x_G^* + \sigma_B \times x_B^*$. Cette dernière expression avec les demandes des biens déterminent l'utilité du consommateur à l'équilibre : $U^* = y^* + x_A^{*\theta} + x_F^{*\varphi} - d \times EM^*$.

A3- Taxe & Objectif d'incorporation de biocarburants

Les relations d'équilibres sur les différents marchés sont :

$$\text{Carburant : } x_F^S = x_F^D \Leftrightarrow (1+\varepsilon)x_G = (1+\varepsilon)\beta x_O = (1+\varepsilon)aL_G = \frac{(1+\varepsilon)}{\varepsilon}x_B = \left(\frac{p_F}{p_y\varphi}\right)^{\frac{1}{\varphi-1}} \quad (52)$$

$$\text{Gazole : } x_G^S = x_G^D \Leftrightarrow \beta x_O = aL_G = \frac{1}{1+\varepsilon}x_F \quad (53)$$

$$\text{Biocarburant : } x_B^S = x_B^D \Leftrightarrow \mu\tilde{x}_A = bL_B = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}x_F \quad (54)$$

$$\text{Colza : } x_A^S = x_A^D + \tilde{x}_A + X_A \Leftrightarrow cL_A^{\alpha+\alpha'} \left(\frac{w}{\tau} \frac{\alpha'}{\alpha}\right)^{\alpha'} = \left(\frac{p_A}{p_y\theta}\right)^{\frac{1}{\theta-1}} + \frac{bL_B}{\mu} + X_A \quad (55)$$

$$\text{Pétrole : } M_O = x_O \Leftrightarrow M_O = \frac{x_G}{\beta} = \frac{aL_G}{\beta} \quad (56)$$

$$\text{Bien composite : } y^S = y^D + Y \Leftrightarrow eL_y = \left[\frac{w}{p_y}(L_G + L_B + L_y) + \frac{taL_G}{p_y} + \frac{p_A}{p_y} \left(X_A + \frac{bL_B}{\mu} \right) - \frac{p_F}{p_y} x_F \right] + Y \quad (57)$$

$$\text{Travail : } \bar{L} = L_y + L_A + L_B + L_G \Leftrightarrow \bar{L} = \left[\frac{y^D + Y}{e} \right] + \left[\frac{\alpha p_A x_A^S}{w} \right] + \left(\frac{\varepsilon}{b} + \frac{1}{a} \right) x_G \quad (58)$$

$$\text{Terre : } \bar{K} = \frac{\alpha' p_A x_A^S}{\tau} \quad (59)$$

$$\text{Balance commerciale : } p_A X_A + p_y Y = p_O M_O = p_O x_O \quad (60)$$

Les variables exogènes du modèle sont : $t, \varepsilon, p_A, p_O, w = 1, \bar{L}, \bar{K}$, et X_A . En utilisant les valeurs de ces variables exogènes et d'autres paramètres, il est possible d'obtenir les expressions des variables endogènes du modèle en résolvant le système d'équations suivant : Equations 6, 7, 8, 10, 11, 30, 31 et 32, et les sept relations d'équilibre décrites ci-dessus. Le niveau des émissions à l'équilibre est simplement $EM^* = \sigma_G \times x_G^* + \sigma_B \times x_B^*$. Cette dernière expression avec les demandes des biens déterminent l'utilité à l'équilibre : $U^* = y^* + x_A^{*\theta} + x_F^{*\varphi} - d \times EM^*$.

A4- La Calibration des Données

Le salaire mensuel brut est de 2764 € (source : INSEE). Le prix du pétrole brut importé est de $p_O = 451.26$ €/tonne (source : Illinois Oil & Gas Association). Ce prix en termes de salaire est égal à : $p_O \equiv \frac{p_O}{w} = 0.163$. Le prix du colza est de $p_A = 365$ €/tonne (source : la France Agricole). Ce prix en termes de salaire est égal à : $p_A \equiv \frac{p_A}{w} = 0.132$. Les surfaces en colza sont de $\bar{K} = 1\,463\,790$ ha (source : FAOSTAT). L'emploi salarié et non-salarié est égal à $\bar{L} = 26\,259\,400$ individus (source : INSEE).

Le paramètre μ est donné par la relation : $\mu = \frac{x_B}{x_A} = 4$ hl/t (source 1 : Sourie et al. (2005) pour l'estimation de la productivité de colza par hectare, approximativement 3 t/ha ; source 2 : F.O. Licht, *Biofuels for Transportation*, pour l'estimation de la productivité du biodiesel par hectare, 12 hl/ha). Il faut multiplier ce paramètre (400 l/t) par la densité du biodiesel qui est de 0.897 kg/litre, et puis le diviser par 1000 pour l'équivalent en tonnes, ce qui donne $\mu = 0.359$. Enfin, il faut le multiplier par le paramètre d'équivalence énergétique entre diesel et biodiesel qui est de 0.9 (source : U.S. Energy Information Administration). On obtient donc $\mu = 0.323$.

Afin de calibrer les paramètres de la fonction d'utilité, nous utilisons les expressions des demandes à l'équilibre. La demande de carburant du consommateur est donnée par $x_F^D = \left(\frac{p_F \times e}{\varphi}\right)^{\frac{1}{\varphi-1}}$. On résout donc l'équation $(\varphi - 1)(\ln x_F^D) = (\ln p_F + \ln e - \ln \varphi)$ avec $x_F^D = 2\,800\,000$ tonnes par mois et $p_F = 0.34849059$ en termes de salaire mensuel par tonne (source x_F^D : la consommation de diesel, UFIP et $p_F = 1.1467$ €/l, équivalent à 963.228 €/tonne, DGEC), et en posant $e = 0.00082$. On obtient donc $\varphi = 0.5$. La demande de colza du consommateur est donnée par $x_A^D = \left(\frac{p_A \times e}{\theta}\right)^{\frac{1}{\theta-1}}$. On résout donc l'équation $(\theta - 1)(\ln x_A^D) = (\ln p_A + \ln e - \ln \theta)$ avec $x_A^D = 61\,270$ tonnes par mois et $p_A \equiv \frac{p_A}{w} = 0.132$, et en posant $e = 0.00082$. On obtient donc $\theta = 0.2854$.

Il nous semble important de détailler l'obtention de la valeur de $x_A^D = 61\,270$ tonnes par mois. En effet, la demande alimentaire de colza n'est pas une donnée disponible. Elle est déduite dans notre modèle à partir de l'équation $x_A^D = x_A^S - \tilde{x}_A - X_A$. Nous cherchons donc les valeurs réelles des variables dans la partie droite de l'équation. Nous commençons par la demande de colza comme matière première agricole pour la production de biodiesel, \tilde{x}_A . Nous connaissons la production de biocarburants en France en 2010, qui est de l'ordre de 2 623 255 tonnes (source : base de données Pégase du Service de l'observation et des statistiques (SOeS)). Cette base ne distingue pas cependant la part de la production de biodiesel dans la production totale de biocarburants. Par conséquent, nous avons repris la même part que celle en 2009, i.e. 70%, fournie par le rapport de l'Ademe (2012, p.83). Ceci conduit à $x_B = 1\,836\,279$ tonnes et à $\tilde{x}_A = 5\,685\,074$ tonnes en 2010, en utilisant la relation $\tilde{x}_A = \frac{x_B}{\mu}$ avec $\mu = 0.323$. En outre, nous savons que 85% du colza français est destiné à la filière de biodiesel (France Agricole, 2010, p.55). Ceci implique que $\tilde{x}_A = 0.85 \times x_A^S$. Nous obtenons donc $x_A^S = 6\,688\,322$ tonnes en 2010. Enfin, les données d'exportations et d'importations de graines de colza nous donnent comme exportations nettes $X_A = 1$

211 000 – 943 000 = 268 000 tonnes en 2010 (source : FranceAgriMer, 2015). Nous obtenons $x_A^D = x_A^S - \tilde{x}_A - X_A = 6\,688\,322 - 5\,685\,074 - 268\,000 = 735\,248$ tonnes en 2010, avec une consommation mensuelle de 61 270.

Nous calibrons maintenant l'élasticité α de la fonction de production du colza : $x_A = cL_A^\alpha K^{\alpha'}$, avec $\alpha + \alpha' < 1$. On va utiliser la formule $\alpha = \frac{\bar{w}L_A}{p_A x_A^S}$ provenant du théorème d'épuisement du produit. Avec $\bar{w} = 33168$ le salaire annuel brut, $L_A = 48\,315$ (sources : données de l'emploi agricole (Agreste, 2013) pondérées par la part des surfaces cultivées en colza en 2010, qui est de l'ordre de 5% (FAOSTAT)), $x_A^S = 6\,688\,322$ tonnes par an, et $p_A = 365$ euros, nous obtenons $\alpha = 0.65$. De façon similaire, nous calibrons α' à partir de la formule $\alpha' = \frac{\tau \bar{K}}{p_A x_A^S}$ avec $\bar{K} = 1\,463\,790$ (source : FAOSTAT) et $\tau = 477$ euros (source : Desbois et Legris (2007)). Nous obtenons $\alpha' = 0.28$. Desbois et Legris (2007) fournissent une évaluation des charges de structure de 477 euros/ha pour la culture de colza en 2004, incluant le coût foncier, l'amortissement du matériel, et tous les autres biens et services. Comme nous nous intéressons uniquement au coût foncier, nous effectuons des analyses de sensibilité des résultats à une valeur plus faible de l'élasticité α' .