

## Anthony Paris

# Les biocarburants dans la transition énergétique : Impacts macroéconomiques et perspectives de développement

Thèse présentée et soutenue publiquement le  Cliquez ici pour entrer une date.  
en vue de l'obtention du doctorat de Sciences économiques de l'Université Paris Nanterre  
sous la direction de Mme Valérie Mignon (Université Paris Nanterre)  
et de M. Julien Chevallier (Université Paris 8)

### Jury :

Co-directeur de thèse	M. Julien Chevallier	Professeur, Université Paris 8
Promoteur IFPEN	M. Benoît Chèze	Chercheur, IFP Energies nouvelles
Promoteur IFPEN	M. Emmanuel Hache	Chercheur, IFP Energies nouvelles
Suffragant	Mme. Delphine Lautier	Professeur, Université Paris-Dauphine
Suffragant	Mme. Antonia Lopez-Villavicencio	Professeur, Université Lumière Lyon 2
Directrice de thèse	Mme. Valérie Mignon	Professeur, Université Paris Nanterre
Rapporteur	M. Philippe Quirion	Directeur de recherche, CIRED
Rapporteur	M. Benoît Sévi	Professeur, Université de Nantes



Alors même qu'ils suscitent de nombreux débats aujourd'hui, le recours aux biocarburants remonte aux débuts de l'industrie automobile avec l'utilisation d'alcool pour certains moteurs à essence et d'huiles végétales pour les moteurs diesel. Durant les années 1920 et 1930, l'usage de biocarburants – purs ou mélangés à un carburant fossile – est effectivement présent dans de nombreux pays tels que l'Afrique du Sud, l'Angleterre, le Brésil, l'Italie, les États-Unis ou la Hongrie (*Kovarik, 1998*). Ce n'est qu'à partir du milieu du XX<sup>ème</sup> siècle que l'usage de carburants issus du pétrole et non mélangé à des biocarburants s'est réellement imposé. Diverses raisons expliquent ce fait : (i) économique, avec un prix des biocarburants élevé au États-Unis (*Kovarik, 1998* ; *Carolan, 2009*), (ii) éthique, avec des critiques sur l'utilisation de produits alimentaires pour le transport (*Kovarik, 1998*), mais aussi (iii) en raison de choix stratégiques des industriels. En effet, la société automobile *General Motors* et la compagnie pétrolière *Standard Oil of New Jersey* se sont par exemple alliées dès 1924 pour produire du carburant fossile non mélangé (*Kovarik, 1998*).

Les biocarburants ne constituent pas un ensemble homogène et plusieurs types et générations sont à distinguer. Ceux-ci comprennent l'éthanol – pour les moteurs à essence – et le biodiesel – pouvant remplacer le diesel. L'éthanol est actuellement produit par fermentation alcoolique de sucres issus majoritairement (i) de plantes alimentaires saccharifères – canne à sucre ou betterave à sucre – et (ii) d'amidon extrait principalement du maïs. Le biodiesel est produit par estérification<sup>1</sup> d'huiles végétales issues de plantes oléagineuses comme le colza, le soja ou le palmier à huile. Il s'agit de la première génération (G1) de biocarburants, présente aujour-

---

<sup>1</sup>L'estérification est la réaction chimique au cours de laquelle un acide carboxylique et un alcool sont transformés en un ester et en eau.

d’hui dans les stations-service. La deuxième génération (G2) de biocarburants – en phase de pré-commercialisation ([IRENA, 2016](#) ; [IEA, 2017](#)) – provient de la biomasse lignocellulosique issue de plantes spécifiquement produites pour une valorisation énergétique – triticale, switchgrass, *etc.* – ou des coproduits de plantes cultivées pour l’obtention d’un bien à plus haute valeur ajoutée comme la paille ou les coproduits de l’industrie du bois – bois de rebut, bois mort, *etc.* Une troisième génération (G3) de biocarburants, en phase de développement, est produite à partir des graisses extraites d’algues. Enfin, une nouvelle génération de carburants de synthèse est en discussion : en réalisant l’électrolyse de l’eau – à l’aide d’électricité renouvelable – afin de produire de l’hydrogène, il est possible de l’assembler à du carbone – obtenu en dissociant du CO<sub>2</sub> capté dans l’atmosphère – pour produire des carburants de synthèse nommés *E-Fuels* totalement neutres en carbone. Les niveaux de maturité de ces différents carburants alternatifs sont résumés dans le tableau 1.

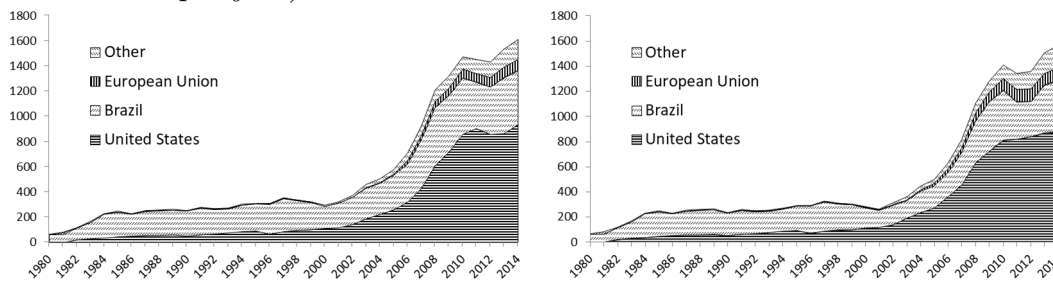
TABLE 1: Niveaux de maturité technologique des biocarburants

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Commer.
	Id	Recherche		Proto.	Démonst.				Pré-com.		
1 <sup>ère</sup> génération											■
2 <sup>ème</sup> génération		■	■	■	■	■	■	■	■	■	
3 <sup>ème</sup> génération				■	■	■	■	■	■	■	
<i>E-Fuels</i>	■										

Note : Les définitions des niveaux de maturité technologique sont disponibles dans [NASA \(2017\)](#) et proviennent à l’origine de [Mankins \(1995\)](#). La maturité de la technologie croît de 0 à 9. Proto., Démonst., Pré-com. et Commer. signifient Prototype, Démonstrateur, Pré-commercialisation et Commercialisation. Les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> générations de biocarburants sont à des stades variés de maturité dus à l’existence de différentes technologies de production. Les degrés de maturité proviennent de [IRENA \(2016\)](#) et des informations sur les bioraffineries fournies dans les rapports *Global Agricultural Information Network (GAIN)* de l’*US Department of Agriculture (USDA) Foreign Agricultural Service*.

La production de biocarburants de première génération procure des avantages aux pays dont le secteur agricole est développé en lui offrant des débouchés supplémentaires. De plus, cette production domestique d'énergie permet de réduire la dépendance énergétique et d'améliorer le solde commercial en diminuant le volume des importations d'énergie (*Criqui et Mima, 2012*). Ces divers avantages, ajoutés à l'occurrence du premier choc pétrolier de 1973, sont les principales raisons de la mise en place du programme *ProAlcool* au Brésil dès 1975. Celui-ci consistait à accroître la part de véhicules *Flex Fuel*, permettant l'utilisation de mélange à taux variable entre carburant pétrolier et biocarburant, et de développer la filière d'éthanol à base de canne à sucre. Cet effort politique a permis au Brésil de dominer le marché de l'éthanol durant deux décennies (voir graphique 1). Des politiques de développement des biocarburants ont aussi vu le jour aux États-Unis avec l'*Energy Tax Act* en 1978, réduisant les taxes sur les mélanges de carburants contenant des biocarburants, et en France avec le plan Carburol de 1981 visant à développer les recherches dans ce domaine.

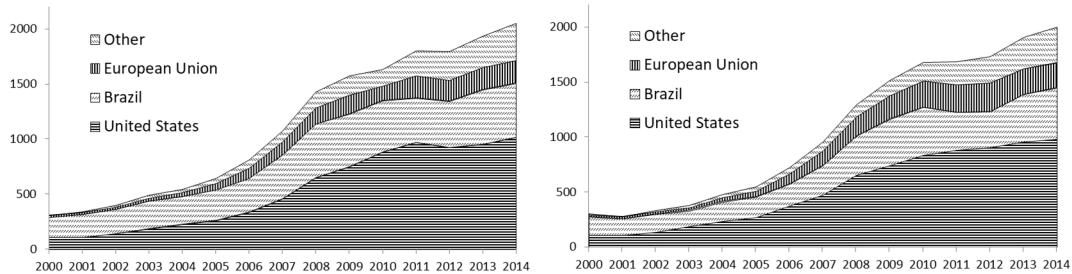
FIGURE 1: Production (gauche) et consommation (droite) mondiale d'éthanol (milliers de barils par jour)



Note : Les autres pays producteurs et consommateurs sont principalement la Chine (respectivement 2,85% et 3,34% de la production et consommation mondiale), le Canada (respectivement 1,90% et 3,06%) et la Thaïlande (respectivement 1,16% et 1,25%). Source : *US Energy Information Administration (US EIA)*.

D'une logique de sécurité énergétique dans les années 1970–1980, le développement rapide des biocarburants depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle (voir graphiques 1 et 2) s'explique désormais par leur avantage environnemental face aux carburants d'origine pétrolière. En effet, le CO<sub>2</sub> émis par la combustion des biocarburants est en majeure partie absorbé lors de la culture des plantes utilisées dans leur production. Ce cycle combustion-absorption du CO<sub>2</sub>, dans le cas des plantes, opère à une échelle de temps restreinte – l'ordre de grandeur dépendant de la durée de croissance de la plante – comparée aux centaines de millions d'années nécessaires au stockage du carbone par les roches sédimentaires ou les hydrocarbures (*Kump et al., 2009*). Ceci explique la différence de résultats des analyses de cycle de vie<sup>2</sup> entre ces types de carburants (voir tableau 2). Cette caractéristique des biocarburants est désormais un des principaux arguments mis en avant pour justifier les politiques de soutien des gouvernements de nombreux pays.

FIGURE 2: Production (gauche) et consommation (droite) mondiale de biodiesel (milliers de barils par jour)



Note : Les autres pays producteurs et consommateurs sont principalement l'Argentine (respectivement 2,99% et 1,52% de la production et consommation mondiale), l'Indonésie (respectivement 2,90% et 1,86%), la Chine (respectivement 2,85% et 3,47%), la Thaïlande (respectivement 1,91% et 1,94%) et le Canada (respectivement 1,76% et 2,91%). Source : *US Energy Information Administration* (US EIA).

<sup>2</sup>Les analyses de cycle de vie permettent de quantifier les impacts environnementaux d'un bien sur l'ensemble de son cycle de vie, *i.e.*, sa production, le transport, sa consommation et son recyclage.

En effet, les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) sont en croissance depuis 1990 (voir graphique 3) malgré les différentes conférences internationales sur ce sujet. Les premiers accords internationaux sur le changement climatique concentraient les efforts de réduction des émissions sur les pays développés – dont les États-Unis et les pays européens en tant que principaux contributeurs de ces émissions. Ces pays se sont engagés à réduire leurs émissions, à réaliser un inventaire annuel de celles-ci, à encourager les transferts de technologie "propre" vers les pays émergents et en développement ainsi qu'à participer au financement de leur projet permettant de limiter leurs émissions.

Au niveau mondial, le secteur des transports engendre environ 15% des émissions de GES. Or, le parc automobile mondial devrait passer de 1 milliard de véhicules particuliers en 2015 à 1,6 milliards en 2040 (*Bloomberg, 2017*), en majeure partie du fait de la croissance des parcs automobiles des pays émergents. La structure future du parc automobile impactera fortement la demande future de carburants et de biocarburants en fonction de la place prise par les véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques. Cependant, bien que les véhicules électriques puissent représenter plus de 30% du parc automobile en 2040 (*Bloomberg, 2017*), ce secteur de marché comprend également les véhicules hybrides participant à la poursuite de la croissance de la demande de carburants, dont celle des biocarburants.

D'après le scénario CPS (*Current Policy Scenario*<sup>3</sup>) de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), ce développement du parc automobile entraînerait une crois-

---

<sup>3</sup>Ce scénario se base sur les politiques actuellement en place. Le scénario NPS (*New Policy Scenario*) prenant en compte les politiques futures déjà annoncées prévoit 4,1 millions de barils par jour – équivalent pétrole – de biocarburants consommé

TABLE 2: Réduction des émissions de GES des biocarburants

Source	Pur	Taux de mélange		
		10%	20%	85%
Betterave à sucre (G1)	53,4%	5,3%	10,7%	45,4%
Blé (G1)	20,2%	2,0%	4,0%	17,2%
Maïs(G1)	20,8%	2,1%	4,2%	17,7%
Canne à sucre (G1)	71,3%	7,1%	14,3%	60,6%
Bois (culture) (G2)	73,6%	7,4%	14,7%	62,6%
Bois (résidu) (G2)	77,5%	7,8%	15,5%	65,9%
Paille (blé) (G2)	89,3%	8,9%	17,9%	75,9%
Colza (G1)	33,8%	3,4%	6,8%	28,7%
Tournesol (G1)	47,6%	4,8%	9,5%	40,4%
Soja (G1)	31,0%	3,1%	6,2%	26,4%
Palmier à huile (G1)	29,0%	2,9%	5,8%	24,6%
Huile de cuisine usagée (G1)	84,1%	8,4%	16,8%	71,5%
Graisse animale (G1)	69,7%	7,0%	13,9%	59,2%
Bois (culture) (G2)	91,7%	9,2%	18,3%	78,0%
Bois (résidu) (G2)	96,6%	9,7%	19,3%	82,1%

Note : Ces réductions sont exprimées en fonction des carburants pétroliers. La première (seconde) partie du tableau concerne l'éthanol (le biodiesel), comparé à l'essence (au diesel). Les données "Pur" et en "Taux de mélange" représentent le pourcentage de réduction des émissions de GES pour le biocarburant pur et mélangé au carburant traditionnel dans les proportions habituelles. Le biodiesel est parfois utilisé pur. Les données proviennent de [Edwards et al. \(2014\)](#). Pour chaque source, les données concernent la technologie de production la moins efficiente en termes de réduction des émissions. Il s'agit donc ici de réductions minimum. Notons tout de même que ces données ne prennent pas en compte des changements indirects d'utilisation des sols.

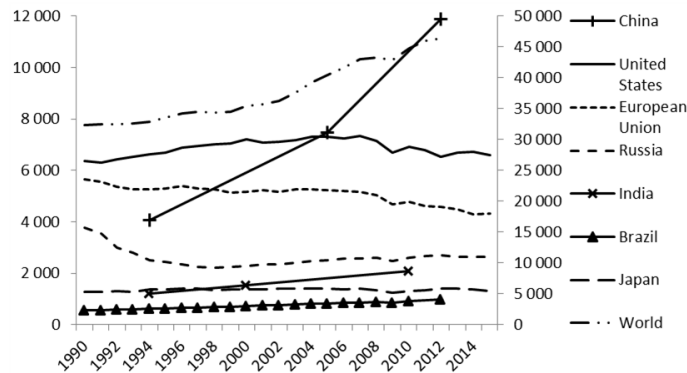
sance de la demande de carburants de 40,7 millions de barils par jour en 2016 à 52,7 millions en 2040 ([IEA, 2017](#)), soit une hausse de près de 30% en 24 ans. Cette demande comprendrait alors 3,2 millions de barils par jour – équivalent pétrole – de biocarburants contre 1,7 millions en 2016. Or ce scénario, prévoyant un quasi-doublement de la consommation de biocarburants, est basé sur les politiques actuelles et ne prend pas en compte les nouvelles politiques nécessaires pour répondre aux objectifs pris lors des accords de Paris (2015) suite à la COP21. Pour répondre à l'objectif d'un secteur énergétique soutenable<sup>4</sup>, l'AIE prévoit une

<sup>4</sup>La définition, selon l'AIE, d'un secteur énergétique soutenable comprend trois objectifs : (i)



demande journalière de 5,6 millions de barils, équivalent pétrole, de biocarburants – soit un facteur de croissance supérieur à 3<sup>5</sup>. La poursuite du développement des biocarburants, en complément de l’expansion des véhicules électriques, devrait permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports, comme ce fut le cas en France durant les années 2000 (voir graphique 4).

FIGURE 3: Emissions de gaz à effet de serre (Mt CO<sub>2</sub> eq.) des principaux pays émetteurs



Note : Les données par pays (échelle de gauche) proviennent de l'*United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Ces pays représentent environ les deux tiers des émissions de gaz à effet de serre mondiales. Les marqueurs présents pour la Chine, l'Inde et le Brésil mentionnent les données des années pour lesquelles ces pays ont déclaré leurs émissions. Les autres pays présentés ici doivent déclarer chaque année leurs émissions. Les émissions mondiales (échelle de droite) sont issues de l'*Emission Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR).

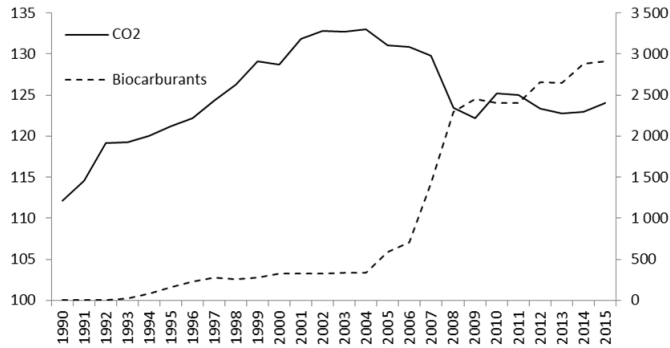
Malgré leurs avantages, en particulier en termes environnementaux, les biocarburants ne sont pas exempts de critiques en termes d'impact inflationniste sur les prix alimentaires, de changement d'affectation des sols et d'effet néfaste sur cer-

l'accès universel à une énergie moderne, (ii) un pic des émissions de gaz à effet de serre en 2040 issue de l'accord de Paris (2015), (iii) une réduction des autres émissions permettant une forte amélioration de la qualité de l'air.

<sup>5</sup>Notons que ce scénario prévoit en plus un développement de l'utilisation des biocarburants dans le secteur aérien avec une consommation de 2,6 millions de barils équivalent pétrole par jour, soit une demande totale de 8,2 millions de barils équivalent pétrole par jour de biocarburants.

tains moteurs.

FIGURE 4: Emissions de CO<sub>2</sub> (kt, échelle de gauche) et consommation des biocarburants (ktep, échelle de droite) dans le secteur routier en France



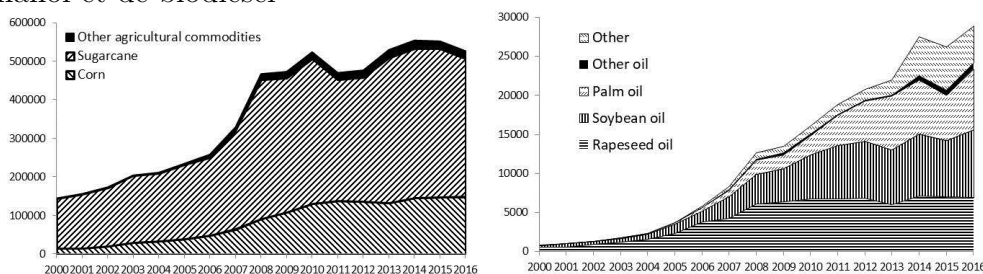
Note : Le CO<sub>2</sub> représentait, en 2015, 99,99% des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du transport routier ainsi que 99,2% des émissions totales mesurées (contre 99,96% et 93,04% en 1990). Cela est dû aux différentes normes EURO mises en place depuis 1992 pour réduire les émissions de gaz localement polluants. Une norme sur les émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules neufs, établie à 120g/km pour un véhicule de taille moyenne, est apparue en Europe en 2012 avec un délai de mise en conformité jusqu'en 2015. Cette norme s'établira à 95g/km en 2020 et devrait s'établir entre 68 et 78g/km en 2025. Source : Les données concernant la consommation annuelle de biocarburants proviennent d'Eurostat alors que le rapport annuel *Citepa* (2017) fournit les émissions de gaz à effet de serre par secteur d'activité.

En effet, l'utilisation de matières premières agricoles dans leur production (voir graphique 5) entraîne un détournement d'une production à caractère alimentaire vers une finalité énergétique. Avec la hausse des prix alimentaires en 2007-2008, les biocarburants ont été critiqués dans le cadre du débat "*food versus fuel*" (*OECD*, 2008). Notons que la production de biocarburants a utilisé plus de 10% de la production mondiale de maïs à partir de 2008 – avec un pic à 15% en 2015 – ainsi que 16% à 22% de la canne à sucre entre 2008 et 2016<sup>6</sup>. Il faut toutefois mentionner que

<sup>6</sup>Ces résultats proviennent des données fournies par l'USDA, concernant les intrants dans la production de biocarburants, et la *Food and Agriculture Organization* (FAO) des Nations Unies pour la production mondiale de ces produits agricoles. Les proportions d'utilisation d'intrants sont difficilement calculables pour les huiles végétales en raison des différentes techniques d'extraction d'huile existantes.

de nombreux autres phénomènes ont pu entraîner cette hausse des prix alimentaires tels la forte croissance des pays émergents entraînant une plus importante demande en denrées alimentaires (*Abbott et al., 2011*), des événements climatiques extrêmes dans certains pays producteurs (*OECD, 2008*) ainsi qu’une hausse de la spéculation sur les marchés agricoles (*Mitchell, 2008*).

FIGURE 5: Consommation mondiale de matières premières (kt) dans la production d’éthanol et de biodiesel



Note : Pour la production d’éthanol (graphique de gauche), les autres matières premières comprennent le blé, le manioc, le sorgho, la betterave à sucre, le seigle, l’orge et la mélasse issue de l’industrie sucrière. Dans le cas du biodiesel (graphique de droite), les autres huiles concernent les huiles de coco, de maïs et de tournesol. Les autres matières premières comprennent les graisses animales et les huiles usagées. Source : Rapports *Global Agricultural Information Network* (GAIN) de l’*US Department of Agriculture* (USDA) *Foreign Agricultural Service*.

L’impact du développement des biocarburants de première génération sur les prix alimentaires est désormais admis au niveau des décideurs publics. Ainsi, la directive de l’Union Européenne 2015/1513 limite aujourd’hui à 7% l’incorporation de biocarburants issus de produits agricoles (première génération) dans la consommation énergétique du secteur des transports. Il n’existe cependant pas de consensus sur cette question. De nombreuses études montrent une corrélation entre les prix agricoles et les prix énergétiques – en particulier le prix du pétrole – (*Nazlioglu, 2011* ; *Nazlioglu et Soytaş, 2012* ; *Lopez Cabrera et Schulz, 2016*), mais il n’existe pas de preuve empirique sur le rôle de la production des biocarburants

dans ce phénomène. De plus, les études manquent sur l'impact du lien entre développement des biocarburants et prix alimentaires sur les pays non producteurs de ces carburants alternatifs – en majorité les pays émergents et en développement. Seuls *Chakravorty et al. (2015)* étudient l'effet du développement de l'éthanol aux États-Unis sur le taux de pauvreté en Inde. Ils prédisent une augmentation de 10% de celui-ci à long-terme.

Au-delà de ses effets sur les prix des matières premières agricoles, le développement des biocarburants peut avoir d'autres impacts. L'utilisation de matières premières agricoles dans la production énergétique peut effectivement entraîner un changement d'affectation des sols. Celui-ci peut être direct – lorsqu'une production agricole à caractère énergétique remplace une forêt – ou indirect – si une forêt est remplacée par une culture agricole à but alimentaire afin de compenser l'affectation d'une culture alimentaire vers une finalité énergétique. Ce changement d'affectation des sols peut conduire à une réduction des services écosystémiques rendus par ces terres. L'impact direct du développement des biocarburants sur la déforestation a notamment été étudié au Brésil. Durant la première décennie du XXI<sup>ème</sup> siècle, les nouvelles mises en culture de canne à sucre pour répondre à la demande d'éthanol auraient concerné dans une faible proportion – entre 0,6% et 3,5% – des terres forestières (*Rudorff et al., 2010*; *Adami et al., 2012*). Le changement indirect d'affectation des sols dû au développement des biocarburants, de par son caractère international, est moins aisé à quantifier mais est notamment souligné dans le cas de la production américaine d'éthanol sur les forêts de pays en développement (*Searchinger et al., 2008*). En particulier, ce changement d'affectation des sols – direct ou indirect – impacte aussi la biodiversité en entraînant la

modification ou la destruction des zones d'habitation de certaines espèces animales.

Enfin, une dernière critique provient des constructeurs automobiles dans le cas du biodiesel. En effet, le biodiesel est composé d'esters saturés, mono-insaturés et poly-insaturés. La présence d'une trop grande proportion d'esters saturés entraîne de mauvaises propriétés à froid du biocarburant alors que des problèmes d'oxydation sont provoqués par les biodiesels contenant une forte quantité d'esters poly-insaturés. Or ces proportions sont différentes en fonction de la plante oléagineuse utilisée pour la production du biodiesel. Ainsi, l'utilisation de biodiesel – à trop grande proportion dans le carburant – à base d'huile de palme, de soja, de tournesol ou de graisses animales doit être compensée par une maintenance du véhicule plus fréquente.

Afin de répondre à ces différentes critiques, une deuxième génération de biocarburants – à base de coproduits des secteurs agricole et forestier ou de plantes énergétiques – a été développée et est en phase de pré-commercialisation. D'une part, ces biocarburants réduisent les émissions de gaz à effet de serre plus fortement que dans le cas de la première génération (voir [tableau 2](#)). D'autre part, l'utilisation de biocarburants, issus de coproduits possiblement non valorisés, n'entrerait pas en compétition avec une utilisation alimentaire et n'entraînerait pas de changement d'utilisation des terres. Cependant, ces avantages sont moins certains dans le cas de biocarburants issus de plantes énergétiques puisque leur culture peut entraîner des changements d'affectation des sols, notamment en remplaçant des terres agricoles en terres à caractère énergétique. Enfin, le biodiesel de deuxième génération serait d'une composition intéressante pour les constructeurs. Leur com-

position chimique est effectivement uniforme entre les différentes sources existantes et n'entraîne pas de complication moteur lors de leur utilisation. Néanmoins, ces nouveaux biocarburants n'offrent pas les mêmes avantages au secteur agricole puisqu'ils ne concernent que leur coproduit et ne leur fournit donc plus de débouchés pour leur culture.

L'existence de ces divers avantages et inconvénients entre les première et deuxième générations de biocarburants peut entraîner des différences dans les préférences des consommateurs entre ces carburants. Notons que malgré leur rôle croissant dans le secteur du transport, les consommateurs ont une connaissance limitée de ceux-ci (*Van de Velde et al., 2009 ; Pacini et Silveira, 2011 ; Aguilar et al., 2015*). De plus, bien que les biocarburants soient perçus comme bénéfiques pour l'environnement (*Solomon et Johnson, 2009 ; Van de Velde et al., 2009 ; Farrow et al., 2011 ; Johnson et al., 2011 ; Dragojlovic et Einsiedel, 2015*) les véhicules électriques sont parfois vus comme une meilleure solution dans la lutte contre le changement climatique (*Petrolia et al., 2010 ; Aguilar et al., 2015*). Notons toutefois qu'aucune étude n'a été réalisée sur le territoire français afin de connaître les préférences des citoyens concernant les divers aspects des biocarburants, notamment quant aux différentes matières premières utilisables.

Ainsi dans un secteur des transports en pleine mutation – avec le développement des biocarburants de première génération, le déploiement des véhicules électriques et les nouvelles perspectives de carburants alternatifs – quelles doivent être les décisions législatives et les stratégies industrielles pour assurer le développement soutenable du secteur des biocarburants ?

Cette thèse a donc proposé une analyse approfondie (i) des impacts économiques des biocarburants en lien avec le développement de leur production, (ii) des préférences des Français entre les différents biocarburants existants et (iii) des caractéristiques spécifiques aux marchés financiers liés aux biocarburants. Outre ces contributions, notre thèse fournit une aide aux décideurs publics quant à la poursuite du développement des biocarburants – notamment de deuxième génération – et une stratégie pour les industriels de ce secteur pour se protéger de la volatilité des prix. À cette fin, nous avons étudié le lien entre les biocarburants de première génération et les prix agricoles, puis les conséquences de l’existence d’une telle relation sur des pays émergents et en développement. Nous avons ensuite analysé les préférences de la population française concernant les différentes caractéristiques des biocarburants. Enfin, nous avons étudié les propriétés du marché financier de l’éthanol aux États-Unis en termes d’efficience, ainsi que sa capacité à être utilisé par les industriels pour réduire leur risque-prix.

La première génération de biocarburants étant produite à partir de matières premières agricoles, le premier chapitre a traité de l’impact de leur développement sur le niveau des prix de produits agricoles. L’expansion de la production de biocarburants a engendré une controverse politique et économique sur la moralité d’utiliser des biens à finalité alimentaire pour un but énergétique : le débat “*food versus fuel*”, dont l’un des axes est la contribution de la production de ces biocarburants à la forte hausse des prix agricoles intervenue durant les années 2000. La littérature se concentre en général sur l’existence d’un lien entre les prix agricoles et énergétiques en étudiant parfois l’apparition d’une rupture dans cette

relation (*Campiche et al., 2007*; *Nazlioglu, 2011*). Même si le rôle du développement des biocarburants est parfois mentionné, les travaux existants ne prennent pas en compte la production de biocarburants dans les études économétriques. Or, ces liens entre prix agricoles et énergétiques peuvent provenir de nombreux canaux de transmission : (i) les coûts de production (*Baffes, 2007, 2010*; *Berument et al., 2014*), (ii) la demande agricole à but alimentaire (*Abbott et Borot de Battisti, 2011*; *Abbott et al., 2011*), (iii) les effets de richesse (*Gohin et Chantret, 2010*) et (iv) la demande agricole à finalité énergétique (*Ciaian et Kancs, 2011*). Afin de contribuer à ce débat, nous avons estimé l'impact de la production de biocarburants de première génération sur le lien entre les prix du pétrole et agricoles avec un modèle de séries temporelles non linéaire, *i.e.*, le modèle de cointégration à transition lisse de *Saikkonen et Choi (2004)*. Prendre en compte les prix de l'énergie, en particulier du pétrole est en effet crucial car ce dernier intervient en tant qu'intrant dans les cultures agricoles et peut être vu comme un substitut aux biocarburants *via* les carburants pétroliers. Nous avons alors mis en évidence le rôle de la production des biocarburants dans la hausse des prix des produits agricoles par le renforcement du lien entre les prix du pétrole et des produits agricoles entrant dans la production des biocarburants. La forte hausse du prix des biens agricoles est donc liée à la fois au développement de ces biocarburants de première génération et aux prix élevés du pétrole durant les années 2000. De plus, les autres produits agricoles (non utilisés dans la production de biocarburants) sont aussi impactés du fait des phénomènes de substitution qui s'opèrent.

Or, de nombreux pays développés – dont l'Allemagne, les États-Unis ou la France – ont encouragé l'utilisation des biocarburants de première génération,



contribuant à l'inflation des prix agricoles au milieu des années 2000. En conséquence, un tel développement de ces biocarburants est susceptible de générer des effets sur les pays émergents et en développement dont l'économie dépend des produits agricoles utilisés dans leur processus de production. Nous avons donc étudié l'impact des variations des prix des matières premières agricoles – entrant dans la production des biocarburants – sur le solde courant de 16 économies émergentes et en développement en prenant en compte les fluctuations du prix du pétrole – ce dernier étant un déterminant des prix agricoles et du compte courant de ces économies. Nous montrons qu'une augmentation de 10% du prix des produits agricoles tend à améliorer d'environ 2% la position du compte courant de ces pays producteurs et exportateurs de produits agricoles. Cet effet tend à diminuer – puis disparaître – lorsque le prix du pétrole dépasse 45 dollars américains par baril pour les économies exportatrices de ces matières premières agricoles et 56 dollars concernant les pays producteurs. Les fluctuations des prix agricoles n'ont pas affecté la balance courante des économies importatrices grâce à la mise en place de politiques de protection de leurs marchés domestiques. Ainsi, le développement des biocarburants à base de produits agricoles peut profiter aux pays émergents et en développement exportateurs et producteurs de ces biens agricoles, sous réserve que l'économie mondiale enregistre une période de bas prix du pétrole.

Afin de pallier les problèmes de la première génération de biocarburants – dont ceux étudiés précédemment –, une deuxième génération est en phase de pré-commercialisation. Celle-ci permet d'accroître les réductions d'émission de GES et les intrants de cette nouvelle génération n'entrent pas en compétition avec la consommation alimentaire. Cependant, les biocarburants de deuxième génération

ne sont pas homogènes et se distinguent entre eux en termes d’impact agricole. En effet, ces biocarburants peuvent être produits à partir de résidus agricoles ou de plantes énergétiques profitant au secteur agricole, mais aussi de résidus de bois. Le choix de l’intrant à utiliser pour leur production peut alors dépendre des préférences de la population en termes d’impacts sur l’environnement et les prix alimentaires – permettant de distinguer entre première et deuxième générations – et de soutien à la filière agricole – permettant de discriminer ces préférences entre les différents intrants de la deuxième génération. Pour révéler ces préférences, nous avons mis en place une enquête à choix discrets – de type *Discrete Choice Experiment* – auprès de 972 Français nous permettant d’analyser la structure de préférence de la population française entre les principales caractéristiques des biocarburants : (i) le soutien à la filière agricole, (ii) les réductions des émissions de GES et (iii) l’impact inflationniste sur les prix alimentaires. Notre analyse souligne la préférence de l’ensemble des répondants pour les biocarburants de deuxième génération en raison d’une aversion à l’égard des hausses de prix des biens alimentaires. Celle-ci est évaluée monétairement par une disposition à payer comprise entre 35,30 euros et 40,80 euros par an pour éviter ces hausses de prix. De plus, une majorité des répondants, *i.e.*, 65,1%, valorise fortement le soutien à la filière agricole avec une disposition à payer de 51,59 euros par an, contre 8,98 euros pour la minorité. La population française est donc partagée sur la question de l’intrant à utiliser pour la production de biocarburants de deuxième génération. La majorité préfère une production à partir de résidus agricoles, alors que la minorité semble favoriser l’usage de résidus de bois ou d’une autre technologie pour réduire les émissions de GES du secteur des transports. Notons aussi que la population française est partagée quant à la valorisation de ces réductions. La majorité est prête à payer

2,64 euros par an par point de pourcentage de réduction des émissions du secteur des transports contre une valorisation à 0,68 euro par la minorité.

Au vu de la poursuite probable de l'expansion du marché des biocarburants, en particulier de deuxième génération, le recours aux marchés financiers dérivés correspondant doit permettre aux industriels d'anticiper les prix futurs et de se protéger de la volatilité des prix. En effet, ces marchés dérivés permettent d'établir le prix sur le marché physique (*Working, 1948*). Cependant, il est nécessaire que ce marché à terme vérifie l'hypothèse d'efficience des marchés pour que le prix à terme soit un prédictor sans biais du prix physique futur (*Chowdhury, 1991*). Cette hypothèse d'efficience de marché stipule que le prix d'un marché reflète l'ensemble des informations existantes (*Fama, 1970*). Dans la version faible de cette hypothèse, l'information considérée est constituée de l'ensemble des prix passés<sup>7</sup>. De plus, cette prédiction du prix physique par le prix à terme est possible *via* le processus de découverte des prix. Celui-ci consiste en la diffusion des informations du prix à terme vers le prix physique dû à l'intégration plus rapide des nouvelles informations sur le marché à terme (*Garbade et Silber, 1983*). Nous avons alors étudié la capacité du marché à terme de l'éthanol du *Chicago Board of Trade* (CBOT) à assurer ces deux fonctions. D'après nos résultats, l'hypothèse d'efficience des marchés financiers ne peut pas être réfutée pour le marché à terme de l'éthanol. En conséquence, le prix à terme est un prédictor sans biais du prix physique et peut donc être utilisé pour fixer les prix des échanges sur le marché physique. Nous étudions également la seconde fonction des marchés à terme. Il s'agit, pour les agents du marché physique, de réduire leur exposition au risque-prix à l'aide de

---

<sup>7</sup>Dans sa version semi-forte, cette information est composée de l'ensemble des informations publiques. Enfin, sa version forte fait le postulat que l'ensemble de l'information privée est disponible au public.

différents outils financiers (options, contrats à terme...) en transférant ce risque aux spéculateurs plus enclins à accepter celui-ci (*Ederington, 1979*) Nous avons alors établi que le recours au marché dérivé permet de réduire de plus de 80% – concernant le premier semestre 2017 – l'exposition au risque-prix des industriels comparée à une situation sans stratégie de couverture du risque ou en utilisant le marché à terme de l'essence. Nous avons montré, à l'aide de simulations, que la stratégie optimale pour le calcul du ratio de couverture consistait à modéliser (*via* un modèle GARCH multivarié) les moments d'ordre 2 du système constitué des prix à terme et physique.

Au total, plusieurs résultats clés peuvent être déduits des analyses menées dans notre thèse. Le premier chapitre a montré l'existence d'un impact négatif des biocarburants de première génération sur les prix agricoles *via* un effet inflationniste. Bien qu'une quantité non négligeable de produits agricoles puisse être utilisée dans la production de biocarburants sans impact sur les prix agricoles – 10% de la production de maïs dans le cas de la production d'éthanol aux États-Unis –, il s'avère impératif de développer une production de biocarburants ne nécessitant pas de matières premières à visée alimentaire. Le deuxième chapitre a mis en évidence un effet positif du développement des biocarburants de première génération sur les économies des pays émergents et en développement lorsque le prix du pétrole n'excède pas 50 dollars le baril. Cependant, il est important de noter que celui-ci fut majoritairement dans un régime de prix supérieur à 50 dollars – en dehors de 2015–2016 – depuis l'expansion des biocarburants. Cette dynamique a donc peu profité à ces économies tout en contraignant les pays importateurs de ces produits agricoles à mettre en place des politiques de protection de leurs marchés domes-

tiques face aux hausses des prix internationaux sur ces matières premières. Les résultats de nos deux premiers chapitres permettent ainsi de comprendre les raisons de la mise en place de la directive européenne 2015/1513 limitant l'usage des biocarburants de première génération et encourageant par là même le développement à grande échelle de la deuxième génération.

Cependant, un investissement important est nécessaire afin de développer cette nouvelle filière. En France, celui-ci pourrait être partiellement financé par une contribution exceptionnelle au vu de la disposition de la population française à financer les biocarburants de deuxième génération. En particulier, les résultats de notre troisième chapitre mettent en évidence une disposition à payer moyenne d'environ 71 euros par an pendant 5 ans dans le cas du développement d'un carburant contenant 20% de biocarburant issu de la paille de blé. De plus, ce montant pourrait varier en fonction de l'hétérogénéité des préférences de la population française afin d'accroître l'acceptabilité de cette contribution. Cette hétérogénéité s'explique en partie par l'âge du répondant – la valorisation des réductions d'émission diminuant avec l'âge – et par son environnement local. En effet, nous montrons que les répondants vivant dans des zones densément peuplées – et donc peu agricoles – valorisent plus ces réductions mais moins l'appui à la filière agricole comparativement à la population située dans des zones faiblement peuplées. Un second axe d'appui à la filière des biocarburants serait de permettre aux industriels de se protéger efficacement face à la volatilité des prix des biocarburants par l'instauration de marchés dérivés sur l'éthanol et le biodiesel en Europe.

Cette thèse peut être étendue dans plusieurs directions. Une première piste

consisterait à étendre l'étude du chapitre 1 à un cadre multivarié afin de pouvoir mettre en évidence l'ensemble des relations entre les prix du pétrole et des principales matières agricoles en fonction de la production de biocarburants. Une telle modélisation permettrait une analyse plus fine des effets de substitution entre produits agricoles. Le chapitre 3 pourrait être enrichi en intégrant dans l'enquête une réduction du prix des carburants contenant des biocarburants. Une telle redistribution de la contribution prélevée vers les consommateurs pourrait accroître l'acceptabilité de celle-ci. De plus, cette enquête pourrait être réalisée dans d'autres pays européens, notamment ceux caractérisés par un secteur agricole peu développé. Une telle extension permettrait d'étudier les préférences concernant les biocarburants dans un pays où la production ne proviendrait pas de produits agricoles domestiques. Enfin, le chapitre 4 peut être étendu en analysant des stratégies de couverture croisée du risque en utilisant des marchés à terme du maïs – en tant qu'intrant principal de l'éthanol américain – ou du pétrole. Il serait aussi pertinent d'intégrer les coûts de transaction afférant à la gestion du portefeuille de couverture.

# Bibliography

- Abbott, P. C. and Borot de Battisti, A. (2011). Recent global food price shocks: Causes, consequences and lessons for African governments and donors. *Journal of African Economies*, 20(Supplement 1):i12–i62.
- Abbott, P. C., Hurt, C., and Tyner, W. E. (2011). What’s driving food prices in 2011? *Farm Foundation Issue Report*.
- Adami, M., Rudorff, B., Freitas, R., Aguiar, D., Sugawara, L., and Mello, M. (2012). Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. *Sustainability*, 4(4):574–585.
- Aguilar, F. X., Cai, Z., Mohebalian, P., and Thompson, W. (2015). Exploring the drivers’ side of the blend wall: U.S. consumer preferences for ethanol blend fuels. *Energy Economics*, 49(C):217–226.
- Baffes, J. (2007). Oil spills on other commodities. *Resources Policy*, 32(3):126–134.
- Baffes, J. (2010). More on the energy/nonenergy price link. *Applied Economics Letters*, 17(16):1555–1558.
- Berument, M. H., Sahin, A., and Sahin, S. (2014). The relative effects of crude oil price and exchange rate on petroleum product prices: Evidence from a set of Northern Mediterranean countries. *Economic Modelling*, 42(3):243–249.

## Bibliography

- Bloomberg (2017). Electric vehicle outlook 2017. Bloomberg publishing, Bloomberg New Energy Finance.
- Campiche, J. L., Bryant, H. L., Richardson, J. W., and Outlaw, J. J. (2007). Examining the evolving correspondence between petroleum prices and agricultural commodity prices. American Agricultural Economics Association Annual Meeting. Portland, OR, July 29-August 1.
- Carolan, M. S. (2009). The contestation and closure of a socio-technical system in the USA. *Social Studies of Science*, 39(3):421–448.
- Chakravorty, U., Hubert, M.-H., and Marchand, B. U. (2015). Food for fuel: The effect of the U.S. biofuel mandate on poverty in India. Discussion paper.
- Chowdhury, A. R. (1991). Futures market efficiency: Evidence from cointegration tests. *The Journal of Futures Markets*, 11(5):577–589.
- Ciaian, P. and Kancs, d. (2011). Interdependencies in the energy-bioenergy-food price systems: A cointegration analysis. *Resource and Energy Economics*, 33(1):326–348.
- Citepa (2017). Rapport CCNUCC.
- Criqui, P. and Mima, S. (2012). European climate-energy security nexus: A model based scenario analysis. *Modeling Transport (Energy) Demand and Policies*, 41:827–842.
- Dragojlovic, N. and Einsiedel, E. (2015). What drives public acceptance of second-generation biofuels? Evidence from Canada. *Biomass and Bioenergy*, 75:201–212.
- Ederington, L. H. (1979). The hedging performance of the new futures markets. *The Journal of Finance*, 34(1):157–170.



## Bibliography

- Edwards, R., Hass, H., Larive, J.-F., Lonza, L., Maas, H., and Rickeard, D. (2014). Well-to-wheels report version 4.a. Technical reports, JRC.
- Fama, E. F. (1970). Efficient capital markets: A review of theory and empirical work. *The Journal of Finance*, 25(2):383–417.
- Farrow, K., Teisl, M., Noblet, C., McCoy, S., and Rubin, J. (2011). *Economics effects of biofuel production*, chapter Does money grow on trees? People’s willingness to pay for cellulosic wood ethanol. InTech.
- Gohin, A. and Chantret, F. (2010). The long-run impact of energy prices on world agricultural markets: The role of macro-economic linkages. *Energy Policy*, 38(1):333–339.
- IEA (2017). World energy outlook 2017. IEA Publishing, International Energy Agency.
- IRENA (2016). Innovation outlook advanced liquid biofuels. Technical report, International Renewable Energy Agency.
- Johnson, D. M., Halvorsen, K. E., and Solomon, B. D. (2011). Upper Midwestern U.S. consumers and ethanol: Knowledge, beliefs and consumption. *Biomass and Bioenergy*, 35(4):1454–1464.
- Kovarik, B. (1998). Henry Ford, Charles Kettering and the fuel of the future. *Automotive History Review*, 32(Spring 1998):7–27.
- Kump, L., Kasting, J., and Crane, R. (2009). *The Earth System*. Pearson, 3<sup>rd</sup> edition.
- Lopez Cabrera, B. and Schulz, F. (2016). Volatility linkages between energy and agricultural commodity prices. *Energy Economics*, 54(1):190–203.

## Bibliography

- Mankins, J. (1995). Technology readiness levels. NASA White Paper.
- Mitchell, D. (2008). A note on rising food prices. *Policy Research Working Paper*, 4682. The World Bank.
- NASA (2017). Technology readiness level definitions. Technical report. Available at: [http://www.nasa.gov/pdf/458490main\\_TRL\\_Definitions.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf) (accessed 12 March 2018).
- Nazlioglu, S. (2011). World oil and agricultural commodity prices: Evidence from nonlinear causality. *Energy Policy*, 39(5):2935–2943.
- Nazlioglu, S. and Soytas, U. (2012). Oil price, agricultural commodity prices, and the dollar: A panel cointegration and causality analysis. *Energy Economics*, 34(4):1098–1104.
- OECD (2008). Rising food prices causes and consequences. Policy brief, Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Pacini, H. and Silveira, S. (2011). Consumer choice between ethanol and gasoline: lessons from Brazil and Sweden. *Energy Policy*, 39(11):6936–6942.
- Petrolia, D. R., Bhattacharjee, S., Hudson, D., and Herndon, C. W. (2010). Do Americans want ethanol? A comparative contingent-valuation study of willingness to pay for E10 and E85. *Energy Economics*, 32(1):121–128.
- Rudorff, B., Aguiar, D., Silva, W., Sugawara, L., Adami, M., and Moreira, M. (2010). Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in Sao Paulo state (brazil) using landsat data. *Remote Sensing*, 2(4):1057–1076.
- Saikkonen, P. and Choi, I. (2004). Cointegrating smooth transition regressions. *Econometric Theory*, 20(2):301–340.

## Bibliography

- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes, D., and Yu, T.-H. (2008). Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, 319(5867):1238–1240.
- Solomon, B. D. and Johnson, N. H. (2009). Valuing climate protection through willingness to pay for biomass ethanol. *Ecological Economics*, 68(7):2137–2144.
- Van de Velde, L., Verbeke, W., Popp, M., Buysse, J., and van Huylenbroeck, G. (2009). Perceived importance of fuel characteristics and its match with consumer beliefs about biofuels in Belgium. *Energy Policy*, 37(8):3183–3193.
- Working, H. (1948). Theory of the inverse carrying charge in futures markets. *Journal of Farm Economics*, 30(1):1–28.