



HAL
open science

Vers un cadre intégré de la conceptualisation de l'analyse de cycle de vie appliquée à la biomasse produite à des fins énergétiques. Partie I: Cadre méthodologique de l'ACV de la biomasse produite à des fins énergétiques: état de l'art et synthèse bibliographique

Mahamadou Belem, H. M. Saley, Philippe Girard

► To cite this version:

Mahamadou Belem, H. M. Saley, Philippe Girard. Vers un cadre intégré de la conceptualisation de l'analyse de cycle de vie appliquée à la biomasse produite à des fins énergétiques. Partie I: Cadre méthodologique de l'ACV de la biomasse produite à des fins énergétiques: état de l'art et synthèse bibliographique. 2013. hal-00851406

HAL Id: hal-00851406

<https://hal.science/hal-00851406>

Preprint submitted on 29 Aug 2013

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.

Vers un cadre intégré de la conceptualisation de l'analyse de cycle de vie appliquée à la biomasse produite à des fins

énergétiques

Partie I

Cadre méthodologique de l'ACV de la biomasse produite à des fins énergétiques : état de l'art et synthèse bibliographique

M. Belem^{1,2}, H. M. Saley^{1,3}, P. Girard^{1,4}

¹ Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement – Fondation 2iE
01 BP 594 Ouagadougou 01 - Burkina Faso – Tél. : (+226) 50 49 28 00 - Fax : (+226) 50 49 28 01

² *Now at* : Centre Régional Agryhmet -

BP 11011 Niamey, Niger

³ *Now at* : Consultante indépendante en modélisation mathématique et statistique – CP 21006 J2C
2B0, Québec - Drummondville – Canada – Email : hmsaley@gmail.com

⁴ *Now at* : CIRAD – Correspondant Cirad office Research & Developement Building –
Kasetsart University - 10900 Bangkok – Thaïlande - Email : philippe.girar@cirad.fr

Rapport de recherche - Mars 2013

Note :

Une première version de cette étude a été réalisée en août 2011 dans le cadre du Post doct de M. Belem Mamadou à l'institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'environnement de (Fondation 2iE). La présente version intègre quelques modifications et des compléments tenant compte des avancées enregistrées dans le domaine depuis cette date.

Sommaire

1.	Introduction	10
1.1.	Les biocarburants, une alternative aux carburants d'origine fossile.....	10
1.2.	La production de la biomasse à des fins énergétiques, plusieurs enjeux.....	11
1.3.	Nécessité de la simulation informatique	12
1.4.	Les objectifs de l'étude	12
1.5.	L'organisation du document	13
2.	Le contexte des biocarburants	13
2.1.	Définition et sources des biocarburants	13
2.2.	Les biocarburants de première génération	14
2.3.	Les biocarburants de seconde génération	14
2.4.	Les biocarburants de troisième génération	15
2.5.	Les acteurs	15
2.6.	Les facteurs de changement	16
2.6.1.	Le changement d'usage des terres	16
2.6.2.	Les facteurs économiques, politiques et technologiques	16
2.6.3.	La sécurité alimentaire.....	17
2.6.4.	Les biocarburants, la pauvreté et l'accès à la terre	18
2.7.	conclusion	19
1.	L'ACV.....	20
1.1.	Définition	20
1.2.	La méthodologie de l'ACV.....	20
1.3.	Application de l'ACV dans l'agriculture	21
1.4.	ACV - biocarburants.....	25
1.5.	Les résultats de l'ACV biocarburants	27
1.5.1.	Les émissions des GES.....	27
1.5.2.	Les biocarburants et les changements d'usage des terres	29
1.5.3.	L'efficacité énergétique des biocarburants.....	29
1.6.	Critiques de la méthodologie ACV.....	30
1.	Les modèles sectoriels.....	33
1.1.	Quelques modèles sectoriels	33

1.1.1.	Le modèle IMPACT.....	33
1.1.2.	Le modèle AGLINK-Cosimo.....	33
1.1.3.	Le modèle POLYSYS.....	34
1.1.4.	Un modèle de genre : le modèle de Arndt.....	34
2.	Les modèles d'équilibre général	35
2.1.	Quelques exemples des modèles d'équilibre général.....	36
2.1.1.	Le modèle GTAP-E.....	36
2.1.2.	Le modèle USAGE	36
2.1.3.	Des modèles de changements d'usage des terres	36
3.	Les modèles multi-niveaux	36
3.1.	Le modèle DIMA.....	37
3.2.	Le modèle de Scheffran and BenDor	38
3.3.	Un modèle basé sur le couplage SMA-ACV.....	38
3.4.	Une méthode intégrée pour l'analyse de la viabilité des biocarburants.....	39
4.	Discussion et conclusion	40
4.1.	De la nécessité du couplage de l'approche top-down et botton-up de la modélisation des biocarburants	40
4.2.	De la nécessité de la modélisation intégrée du système biocarburants	41
1.	Quels facteurs à considérer dans le contexte africain ?.....	44
1.1.1.	La dynamique démographique.....	44
1.1.2.	Le genre.....	44
1.1.3.	Le foncier	44
1.1.4.	La gestion des terres marginales	45
1.1.5.	La gestion des ressources en carbone	45
1.2.	Quel type de modèle ?.....	45
1.3.	Les systèmes multi-agents	46
1.4.	Vers une approche participative	47
	Conclusion	48
	Références.....	49

Liste des figures

Figure 1: Les sources des biocarburants les procédés de transformation (Bessou et al., 2011)	13
Figure 2: La production mondiale de l'éthanol et du biodiesel (Bessou et al., 2011)	14
Figure 3: Le cadre d'analyse avec l'ACV	21
Figure 4: Représentation schématique du processus ACV en agriculture: cas de la production des tomates (Hayashi et al., 2006).....	22
Figure 5: Le domaine d'étude des biocarburants en ACV(Davis et al., In Press).....	26
Figure 6: Cadre méthodologique intégré de l'analyse de la viabilité des biocarburants (Halog and Manik, 2011).....	40
<i>Figure 7: Représentation hiérarchique du point de vue fonctionnel du système (Halog and Manik, 2011)</i>	<i>43</i>
Figure 9: La méthodologie intégrée pour l'analyse des biocarburants en Afrique	46

Liste des tableaux

Tableau 1: Les avantages des biocarburants (Demirbas, 2009)	10
Tableau 2: Tableau comparatif des coûts de production des biocarburants et des prix des carburants fossiles (Rajzgopal and Zilberman, 2007)	17
Tableau 3: Evolution des prix des céréales et des huiles végétales entre 2006 et 2007 (FAO, 2008) ...	18
Tableau 4: Les unités fonctionnelles couramment utilisées en ACV-Agriculture (Haas et al., 2000)	23
Tableau 5: Les catégories d'impacts et les indicateurs pris en compte dans l'étude	24
Tableau 6: Quelques cas d'application de l'ACV dans l'agriculture	25
Tableau 7: L'impact de l'éthanol et du biodiesel sur les émissions de GES dans différentes régions du monde (Bessou et al., 2011).....	28
Tableau 8: Tableau comparatif de l'efficacité énergétique des biocarburants et des carburants d'origine fossile (FAO, 2008)	30
Tableau 9: Les activités et les facteurs pris en compte par le modèle	34
Tableau 10: Comparaison entre l'ACV et les SMA.....	39
Tableau 11: Les modèles de simulation de la production de la biomasse et des biocarburants . Erreur ! Signet non défini.	

Résumé

Cette étude est une synthèse bibliographique sur l'utilisation de l'ACV et de la modélisation pour analyser les impacts de la production de la biomasse énergétique. L'analyse de ces deux méthodes a été basée sur les concepts utilisés, leurs objectifs, les indicateurs, les dimensions d'analyse (environnementale, sociale, politique et économique) pris en compte et leur capacité à représenter tout le cycle de production des biocarburants, c'est-à-dire de la production au champ jusqu'à l'utilisation pour la production d'énergie. Dans un second temps, il a été proposé un cadre méthodologique intégré pour la simulation du système biocarburants africain à différentes échelles, c'est-à-dire du local au global.

Mots clés : Bio-carburant – Analyse de cycle de vie – Modélisation – Afrique de l'Ouest

Chapitre 1. Contexte de l'étude

INTRODUCTION

LES BIOCARBURANTS, UNE ALTERNATIVE AUX CARBURANTS D'ORIGINE FOSSILE

Les carburants d'origine fossile participent à 80% à la consommation énergétique mondiale montrant ainsi la forte dépendance de l'économie mondiale vis-à-vis de cette ressource (2011). Avec la croissance démographique et l'expansion économique des pays en voie de développement, ces besoins augmenteraient de 60% d'ici 2030 selon la FAO (Bessou et al., 2011).

Cependant, l'utilisation croissante des carburants d'origine fossiles pose des problèmes du point de vue environnemental et économique. Selon le rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC, 2007), l'utilisation croissante des carburants d'origine fossile augmenterait les émissions des GES. A cela s'ajoute la diminution des réserves mondiales du pétrole, mettant en cause la sécurité énergétique dans le futur. Enfin, suite à la crise énergétique mondiale des années 1970, le prix du pétrole a connu une augmentation considérable affectant négativement l'économie des pays en voie de développement. Face à ces différents problèmes, une alternative à l'utilisation des carburants d'origine fossile s'impose.

Parmi les solutions alternatives, l'utilisation des sources énergies renouvelables telles que la biomasse offre de bonnes perspectives d'avenir et reçoit de fait une attention particulière. Dans plusieurs pays -Burkina Faso, Brésil, Etats Unis, Union Européenne -, la production et l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques est prise en compte dans les politiques énergétiques nationales (Demirbas, 2009; Blin et al., 2010; Bessou et al., 2011). Le Brésil, par exemple, prévoit de remplacer 10% de la consommation mondiale d'essence par des biocarburants d'ici 2012 (Valdes, 2007) tandis que le USA prévoit de remplacer 15% de leur consommation nationale par des carburants alternatifs d'ici 2022 (Birur et al., 2008). Par ailleurs, "la directive européenne 2003/30 recommande aux états membres de fixer un objectif d'incorporation de 2% de biocarburants pour les véhicules en 2005, et une augmentation de 0,75% par an pour atteindre fin 2010, 5,75% du volume de l'ensemble de l'essence et du diesel vendus pour le transport routier" (Desgain, 2005).

Cet intérêt grandissant pour la biomasse comme source d'énergie s'explique par le fait qu'elles présentent plusieurs avantages aussi bien du point de vue économique, social, énergétique qu'environnemental (Tableau 1).

TABLEAU 1: LES AVANTAGES DES BIOCARBURANTS (DEMIRBAS, 2009)

Impacts économiques	Durabilité
	Diversité des combustibles
	Création des emplois en milieu rural
	Augmentation des impôts
	Développement de l'agriculture
	Compétitivité internationale
	Réduction de la dépendance à l'égard du pétrole importé

Impacts environnementaux	Réduction de l'émission des GES
	Réduction de la pollution
	Biodégradabilité
	Une plus grande efficacité à la combustion
	Amélioration de l'usage des terres et de l'eau
Sécurité énergétique	Séquestration du carbone
	Consommation domestique
	Fiabilité de l'approvisionnement
	Réduction des combustibles d'origine fossile
	Disponibilité
	Distribution domestique
	Renouvelable

LA PRODUCTION DE LA BIOMASSE À DES FINS ÉNERGÉTIQUES, PLUSIEURS ENJEUX

Cependant le bienfait des biocarburants ne fait pas l'unanimité et leur utilisation soulève de nombreuses controverses. Leur production nécessite une consommation importante des carburants conventionnels, des pesticides et des intrants (Ndong et al., 2009) qui sont responsables des émissions des gaz à effet de serre (GES) et de la dégradation des sols. La compétition avec l'agriculture pour l'utilisation des terres a entraîné une augmentation des prix des produits alimentaires provenant de l'agriculture (FAO, 2008). Enfin, la viabilité économique et énergétique de la biomasse comme source énergétique dépend des matières premières, de la technologie de transformation utilisées et des appuis politiques qui engendrent une forte mobilisation des ressources publiques.

Face à ces controverses, de nombreuses études ont été réalisées pour comparer, maîtriser leur impact environnemental et garantir leur viabilité économique et énergétique.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est couramment utilisée à cet effet (Cherubinina et al., 2009; Ndong et al., 2009; Bessou et al., 2011). L'ACV est une méthodologie normalisée et standardisée (ISO, 2006) et basée sur une approche holistique permettant d'évaluer l'impact d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie du « berceau à la tombe ». Considéré comme un véritable outil d'aide à la décision, l'ACV est de plus en plus utilisée par les acteurs locaux, les décideurs et les chercheurs pour évaluer l'impact de leur stratégie sur l'environnement. Initialement conçue pour évaluer l'impact environnemental des processus industriels, l'ACV est devenue incontournable dans l'agriculture (Haas et al., 2000; FAO, 2008). Elle est également utilisée pour évaluer l'impact environnemental et la performance énergétique des biocarburants (Ndong et al., 2009).

Cependant, l'ACV est limitée pour prendre en compte toute la complexité d'un système. Elle est basée sur des processus fastidieux, longs et nécessitant beaucoup de données qui sont souvent difficiles à estimer. Ses résultats sont dépendants du site et de la période d'étude d'où des difficultés de réutilisabilité des résultats d'analyse. De surcroît, l'ACV est limitée pour prendre en compte la dimension temporelle d'un système. Les impacts des modes de gestion (gestion de la terre, les systèmes de culture, etc.), des choix politiques ne sont pas immédiats. Ils peuvent intervenir après plusieurs années– 10, 100 ans - nécessitant de prédire à long et à court terme la dynamique du système sous différentes trajectoires. De même, l'analyse de la production des biocarburants ne peut

pas être appréhendée à une seule échelle. Elle nécessite d'articuler des niveaux de décision entre les échelles nationale, régionale et locale et les interactions à ces différentes échelles avec d'autres activités de l'économie. L'ACV n'intègre pas la dimension spatiale et les interactions avec les autres activités. La dimension socio-économique n'est pas prise en compte. L'utilisation de la biomasse a des impacts sociaux et économiques tels que l'amélioration des conditions de vies des producteurs, la création d'emplois, la réduction du coût du transport, etc. En plus, la biomasse est une ressource renouvelable dont la dynamique est le résultat des interactions entre les activités humaines et la dynamique des écosystèmes. Il est donc nécessaire de prendre en compte les différents impacts socio-économiques pour une analyse approfondie du système. Finalement, l'ACV est difficilement utilisable comme outil d'aide à la décision surtout comme un véritable outil de prospection et d'identification des scénarios de gestion innovante à long terme des ressources renouvelables telles que la biomasse.

NÉCESSITÉ DE LA SIMULATION INFORMATIQUE

Les limites de la méthodologie ACV et les enjeux de la production des biocarburants mettent en évidence la nécessité des modèles de simulation. Ces outils permettent de rendre compte de la dynamique d'un système sous différents scénarios tout en intégrant la dimension spatio-temporelle et des interactions avec d'autres systèmes ou processus. Plusieurs modèles ont été ainsi développés pour optimiser le coût de production des biocarburants (Kwiatkowski et al., 2006), pour analyser la viabilité économique et environnementale des technologies de transformation de la biomasse (Davis et al., 2009), pour analyser l'impact des politiques sur leur production et leurs impacts sur l'environnement, la production agricole et l'économie (Breuss and Steining, 1998; Birur et al., 2008; Arndt et al., 2011).

Cependant, ces modèles n'offrent pas un cadre adéquat permettant de représenter de façon exhaustive à la fois les dimensions environnementale, économique, sociales politique qu'implique l'analyse de la production de la biomasse. La prise en compte simultanée de ces différentes dimensions nécessite une approche basée sur la modélisation intégrée. La modélisation intégrée est basée sur l'intégration de modèle de différents types pour représenter un système perçu à des échelles différentes. Elle offre un cadre adéquat pour prendre en compte toute la complexité d'un système. Avec la modélisation intégrée, le modèle devient plus qu'un simple outil, il devient un véritable outil de collaboration et de recherche pluridisciplinaire.

LES OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif de cette étude est de réaliser dans un premier temps une synthèse bibliographique sur l'utilisation des ACV et de la modélisation pour analyser les impacts de la production de la biomasse énergétique. L'analyse de ces deux méthodes est basée sur les concepts utilisés, leurs objectifs, les indicateurs, les dimensions d'analyse (environnementale, sociale, politique et économique) pris en compte et leur capacité à représenter tout le cycle de production des biocarburants, c'est-à-dire de la production au champ jusqu'à l'utilisation pour la production d'énergie. Dans un second temps, il s'agira de proposer un cadre méthodologique intégré pour la simulation du système biocarburants africain à différentes échelles, c'est-à-dire du local au global.

L'ORGANISATION DU DOCUMENT

Ce document est organisé comme suit. La première partie donne un aperçu sur le contexte des biocarburants. La seconde partie porte une description de l'ACV et son application dans l'agriculture et la production de la biomasse. La troisième partie s'intéresse à une revue de lecture sur des modèles de simulation. La quatrième partie propose un cadre méthodologique intégré pour analyser la production de biomasse énergétique tout en prenant en compte les dimensions socioéconomique, environnementale et politique. La dernière partie conclut cette étude et présente des perspectives.

LE CONTEXTE DES BIOCARBURANTS

DÉFINITION ET SOURCES DES BIOCARBURANTS

Les biocarburants sont des sources d'énergie qui stockent l'énergie dérivée de la biomasse (FAO, 2008). Plusieurs types de biomasse sont utilisés pour produire les biocarburants : les fibres, les produits alimentaires, le bois, les cultures énergétiques (le maïs, le soja, l'arachide, le coton, le tournesol, le jatropha, etc.), les résidus forestiers, les déchets issus de l'agriculture, les micro-algues (Figure 1). On distingue (1) des biocarburants solides tels que les bois de feu, le charbon, les granulés de bois, (2) des biocarburants liquides tels que l'éthanol, le biodiesel, l'huile de pyrolyse et (3) les biocarburants gazeux tel que le biogaz. En fonction des types de biomasse et des techniques de transformation utilisés pour leur production, on distingue des biocarburants de première génération, de seconde génération et de troisième génération (cf. sections 0, 0 et 0).

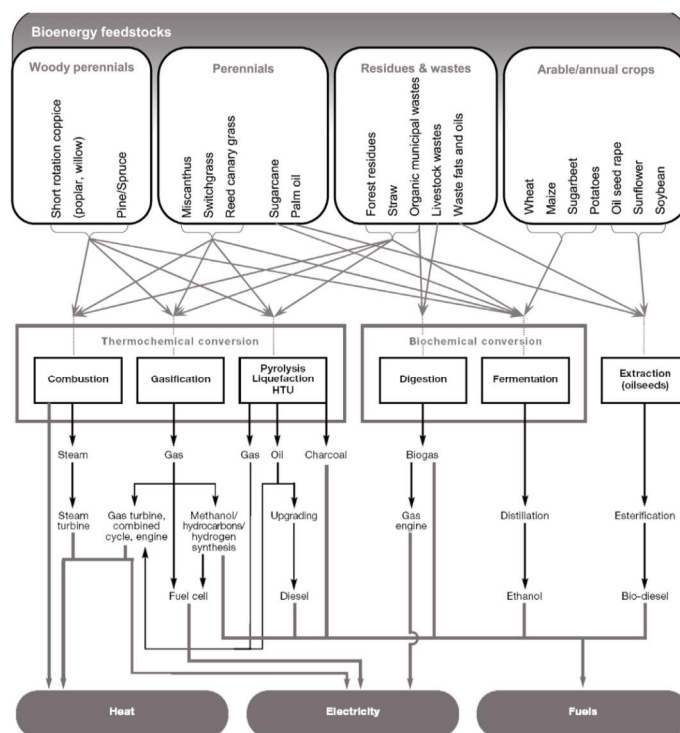


FIGURE 1: LES SOURCES DES BIOCARBURANTS LES PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION (BESSOU ET AL., 2011)

En plus de la biomasse comme matière première essentielle intervenant dans la production des biocarburants, plusieurs autres ressources sont utilisées. Il s'agit des terres de culture, de l'eau, des intrants agricoles, des forces de travail, des semences, de l'énergie, des nutriments, etc. La biomasse produite est transformée à travers un procédé technique pour extraire le biocarburant.

Du point de vue usage, les biocarburants sont utilisés pour le chauffage, la production de l'électricité et comme carburant. Aujourd'hui, ils participent à 10% à la production de l'énergie mondiale. Leur production connaît une forte augmentation due à la demande de plus en plus importante (Figure 2). En 2007, avec 51% de la production mondiale d'éthanol, les Etats Unis se positionnent comme le premier producteur mondial d'éthanol (FAO, 2008). Le Brésil vient en seconde position avec 36% de la production mondiale. Il faut noter que la production mondiale des biocarburants est répartie entre les biocarburants de 1^{ère}, 2^{nde} et de 3^{ème} génération.

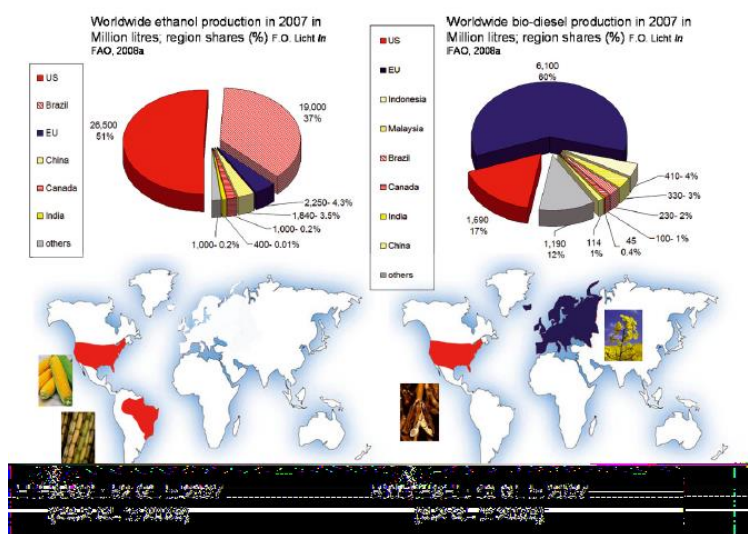


FIGURE 2: LA PRODUCTION MONDIALE DE L'ÉTHANOL ET DU BIODIESEL (BESSOU ET AL., 2011)

LES BIOCARBURANTS DE PREMIÈRE GÉNÉRATION

Ce sont des biocarburants couramment utilisés. Les biocarburants de 1^{ère} génération sont produits à partir des cultures vivrières (le maïs, le blé, le colza, la betterave) à travers des techniques simples telle que la fermentation. L'inconvénient majeur des biocarburants de 1^{ère} génération est l'utilisation des cultures destinées à la consommation et l'utilisation des terres destinées à l'agriculture vivrière. Leur production est en partie responsable de l'augmentation des prix des produits alimentaires et de la crise alimentaire de 2007. Les biocarburants de 2^{nde} génération ont été ainsi développés pour diminuer ces impacts.

LES BIOCARBURANTS DE SECONDE GÉNÉRATION

Les biocarburants de 2^{nde} génération sont produits à partir des ressources lignocellulosiques à travers des procédés biochimiques (ou pyrolyse) et thermochimiques (la gazéification de la biomasse).

Contrairement aux biocarburants de 1^{ère} génération, les biocarburants de 2^{nde} génération n'utilisent pas des cultures vivrières. Les ressources végétales utilisées sont les déchets agricoles, les déchets d'exploitation agricole, les déchets d'industrie du bois et du papier et les cultures dédiées (le triticale, le miscanthus, le peuplier, etc.). De nos jours de nombreux projets de recherche ont été mis en place pour développer des technologies de transformation destinées à la production des biocarburants de 2^{nde} génération. Mais l'efficacité de ces technologies reste à prouver. De surcroît, la production des biocarburants de 2^{nde} est assez limitée pour couvrir le besoin mondial.

Si les biocarburants de 2^{nde} génération ont permis de diminuer l'utilisation des produits de cultures alimentaire, il reste que la production de matière première essentielle est toujours dépendante de l'utilisation des ressources en terre ; d'où le développement des biocarburants de 3^{ème} génération.

LES BIOCARBURANTS DE TROISIÈME GÉNÉRATION

Les biocarburants de 3^{ème} génération sont encore au stage de la recherche scientifique. L'objectif est de produire des biocarburants à partir des micro-organismes et des micro-algues. Ces procédés permettront de s'affranchir de l'utilisation des sols et des cultures vivrières. L'abondance des ressources exploitables permet d'espérer une production plus importante que celle des biocarburants de 1^{ère} et de 2^{nde} génération et de réduire considérablement la dépendance vis-à-vis de l'énergie fossile.

LES ACTEURS

L'infrastructure des biocarburants est le lieu d'interactions entre différents acteurs à différentes échelles. Ces acteurs interviennent à différents niveaux de décisions et sont motivés par des objectifs différents et souvent contrastés. Magrin and Dieye (2007) identifient les acteurs suivants :

1. Les gouvernements appuient la production et l'utilisation des biocarburants pour atteindre leurs objectifs de sécurité énergétique, pour relancer l'économie et faire face aux changements climatiques.
2. Le secteur privé à travers les entreprises joue un rôle important dans la filière biocarburants. Leurs objectifs est la production et la commercialisation des biocarburants.
3. Les ONG, les investisseurs étrangers seuls ou en collaboration avec les gouvernements et le secteur privé participent à l'appui de la filière biocarburants. Leurs objectifs sont (1) de garantir la sécurité énergétique, (2) de faire face aux enjeux environnementaux tel que le changement climatique et (3) d'appuyer le développement économique des pays en voie de développement. La Chine, le Japon, les Etats du Golfe, l'Inde, l'Union Européenne, les Etats-Unis, les pays du Maghreb font partie des principaux investisseurs étrangers en Afrique (Dabat, 2011).
4. Les acteurs locaux qui concernent (1) les coopératives locales œuvrant pour l'autoconsommation des biocarburants produits et (2) les collectivités locales pour la régulation de l'accès aux terres et l'insertion des biocarburants dans la planification locale pour la gestion de l'espace.

La multiplicité des acteurs et des niveaux de décision auxquels interviennent ces acteurs, « posera à nouveau le problème de l'articulation des niveaux de décision entre les échelles nationale, régionale et locale et celui de la cohabitation des territoires de nature différents (celui des agro-industries et contre le domaine national géré par les collectivités locales) » (Magrin and Dieye, 2007). Elle nécessite de trouver un meilleur compromis entre les différents intérêts dont les impacts sont variables d'une politique à l'autre. Ce qui nécessite sans doute un véritable cadre de dialogue entre les différents acteurs pour non seulement étudier l'impact de leurs actions mais aussi pour comparer leurs points de vue afin de déterminer des scénarios de gestion innovants. L'ACV et les modèles de simulations sont adaptés à cet effet.

LES FACTEURS DE CHANGEMENT

La production des biocarburants évolue dans un contexte dynamique et évolutif et est influencé par plusieurs facteurs externes et internes : les changements d'usage des terres, les facteurs économiques et technologiques, la sécurité alimentaire, la pauvreté, etc.

LE CHANGEMENT D'USAGE DES TERRES

La production des biomasses à des fins énergétiques influence l'usage des terres. Leurs impacts sur le changement d'usage des terres peuvent être directs ou indirects et concernent principalement les émissions des GES, la réduction des terres agricoles, les changements des modes de gestion (diminution de la durée des jachères par exemple) (cf. 0). Cependant la production des biocarburants sur des terres marginales pourrait favoriser la séquestration du carbone qui joue un rôle essentiel dans la régulation du changement climatique global (Fritsche, 2008).

LES FACTEURS ÉCONOMIQUES, POLITIQUES ET TECHNOLOGIQUES

La viabilité économique des biocarburants dépend de la biomasse (jatropha, canne à sucre, maïs, ...), de la matière première, du type énergie (électricité) et de la technologie utilisés pour la production. Ces différents facteurs ont un coût économique d'un type à l'autre. L'objectif des acteurs est de trouver la meilleure combinaison (biomasse, matière première, technologie, etc.) pour optimiser la production des biocarburants du point de vue économique. Cependant, le coût de production des biocarburants reste élevé. Cela influence négativement le prix des biocarburants et par conséquent la consommation. Ainsi, des politiques ont été développés pour non seulement réduire le coût de production mais aussi favoriser la consommation des biocarburants. Les politiques biocarburants consistent (1) à subventionner la production des biocarburants, (2) à réduire des taxes sur les biocarburants pour les rendre plus compétitifs vis-à-vis d'autres sources d'énergie et (3) à réduire des prix des biocarburants sur le marché pour accroître la demande.

Plusieurs études montrent que le coût de production des biocarburants sans appuis politique est supérieur aux prix des carburants conventionnels (Tableau 2). Aux USA, le coût de production de l'éthanol sans subvention était de 0.46\$ l⁻¹ en 2005 alors que le prix de l'essence s'élevait à 0,44\$ l⁻¹ (Hill et al., 2006). Le coût de production du biodiesel produit à partir du soja était de 0.55\$ l⁻¹ alors que le prix du diesel conventionnel s'élevait à 0,46\$ l⁻¹. Cependant, avec l'augmentation continue des

prix des carburants, du trafic routier qui demande de plus en plus de carburants, les appuis accordés au développement des biocarburants vont continuellement augmenter. Cette tendance posera sans doute des questions sur la limite à ne pas dépasser concernant les soutiens accordés aux biocarburants, car ce sont des ressources publiques qui sont essentiellement utilisées. L'objectif des gouvernements est de définir une allocation optimale des ressources publiques qui sont des ressources limitées et dont la gestion doit satisfaire à plusieurs contraintes. Ainsi, les gouvernements doivent trouver un meilleur compromis entre les objectifs du développement des biocarburants et les autres objectifs du développement socioéconomique et d'analyser les impacts de leurs appuis au secteur biocarburant. Ce qui nécessite des outils de planification et d'aide à la décision dont les modèles de simulation qui constituent des solutions pertinentes.

La mobilisation des ressources financières et la nécessité de technologies adéquates et souvent chères constituent sans doute des barrières au développement de la filière dans les pays en voie de développement. Si les pays développés ont une large avancée en termes de développement technologique et disposent d'importantes ressources pour appuyer la production et l'utilisation des biocarburants, il n'en est pas de même pour les pays en voie de développement particulièrement les pays africains qui peinent déjà à supporter la production agricole. Mais, vu l'opportunité que présentent les biocarburants, plusieurs investissements sont accordés à ces pays pour les accompagner dans leur politique d'autonomisation énergétique. Ces investissements concernent des institutions privées ou publiques (sociétés, entreprises d'Etat ou fonds d'investissement) à capitaux souvent de pays riches ou émergents (Chine, Japon, Etats du Golfe, Inde, Union Européenne, Etats-Unis, pays du Maghreb...) (Dabat, 2011).

TABLEAU 2: TABLEAU COMPARATIF DES COÛTS DE PRODUCTION DES BIOCARBURANTS ET DES PRIX DES CARBURANTS FOSSILES (RAJZGOPAL AND ZILBERMAN, 2007)

Countries/Community	Ethanol	Gasoline (US\$ per energy-equivalent litre*)	Biodiesel	Diesel
	0.82	0.54		0.57
	(wheat)	(with tax)	0.62	(with tax)
US	0.45	0.38	(vegetable oils)	0.37
	(maize)	(without tax)		(without tax)
Canada	0.85	0.68	0.50	0.68
	0.50	0.40		0.39
EU-15	0.88	1.32	0.68	1.29
	0.68	0.40		0.40
Poland	0.80	1.2	0.82	1.1
	0.51	0.39		0.38
Brazil	0.35	0.84	0.65	0.49
	(sugar cane)	0.39		0.38

LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Les investissements accordés aux biocarburants soulèvent de nombreuses controverses dont le problème de la sécurité alimentaire. Grâce à ces investissements et des efforts réalisés au niveau national, on assiste à une augmentation de la production des biocarburants, l'affectation accrue des terres de culture à la production de la biomasse énergétique qui ont pour conséquence

l'augmentation des prix des produits agricoles et de l'importation des céréales et des huiles végétales. Les études réalisées par la FAO ont montré une relation positive entre la demande en biocarburants et les prix des céréales et des huiles végétales importés (Tableau 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'augmentation de la demande en biocarburants serait responsable de l'augmentation de 30% des prix des grains entre 2000 et 2007 (Rosegrant, 2008). Ces augmentations sont source d'insécurité alimentaire. Ainsi, selon la FAO (2008), il existe une relation positive entre l'importation des céréales et la prévalence de la malnutrition.

Cependant, l'impact négatif des biocarburants sur la sécurité alimentaire pourraient être allégés par l'amélioration des revenus.

TABLEAU 3: EVOLUTION DES PRIX DES CÉRÉALES ET DES HUILES VÉGÉTALES ENTRE 2006 ET 2007 (FAO, 2008)

COMMODITY	WORLD		DEVELOPING COUNTRIES		LDCs ¹		LIFDCs ²	
	2007 (US\$ million)	Increase over 2006 (Percentage)	2007 (US\$ million)	Increase over 2006 (Percentage)	2007 (US\$ million)	Increase over 2006 (Percentage)	2007 (US\$ million)	Increase over 2006 (Percentage)
Cereals	268 300	44	100 441	35	8 031	32	41 709	33
Vegetable oils	114 077	61	55 658	60	3 188	64	38 330	67
Meat	89 712	14	20 119	18	1 079	24	8 241	31
Dairy	86 393	90	25 691	89	1 516	84	9 586	89
Sugar	22 993	-30	11 904	-14	1 320	-25	4 782	-37
Total food	812 743	29	253 626	33	17 699	28	119 207	35

¹ Least-developed countries (see footnote 13).

² Low-income food-deficit countries. FAO classifies countries as low-income food-deficit on the basis of three criteria: their per-capita income; their net food trade position; and a "persistence of position", which postpones the "exit" of an LIFDC from the list, despite the country not meeting the LIFDC income criterion or the food-deficit criterion, until the change in its status is verified for three consecutive years. For a detailed description of the criteria and a list of LIFDC countries, see: <http://www.fao.org/countryprofiles/lifdc.asp>.

LES BIOCARBURANTS, LA PAUVRETÉ ET L'ACCÈS À LA TERRE

La production de la biomasse énergétique qui a eu lieu principalement en milieu rural permet l'amélioration des conditions de vie des paysans à travers l'augmentation de leurs revenus. L'augmentation des revenus permettrait l'amélioration du pouvoir d'achat des paysans et de faire face à l'augmentation des prix des céréales. Cependant, les revenus générés sont inégalement répartis dans la population.

Une étude récente (Amigun et al., 2011) montre qu'en Afrique, l'augmentation des revenus profiterait plus aux hommes qu'aux femmes, dû à leur différences liées à l'accès aux ressources. En Afrique, les terres appartiennent aux hommes. Ces derniers contrairement aux femmes ont facilement accès aux crédits (Amigun et al., 2011). Les terres marginales sont généralement cultivées par les femmes pour assurer une partie de leurs revenus et de la consommation familiale. Par

conséquence, l'utilisation des terres marginales pour la production des biocarburants risquerait de réduire la participation des femmes aux décisions liées aux activités agricoles, leur contrôle sur les terres et la sécurité alimentaire (Amigun et al., 2011). Les petits paysans tout comme les femmes ont un accès limité à la terre. Ainsi, l'expansion de la culture biocarburants augmenterait la compétition pour l'accès à la terre (FAO, 2008) et des conflits fonciers et soulèvera des problèmes d'articulation entre la gestion coutumière et la gestion administrative des terres sur lesquelles reposent l'accès aux terres.

CONCLUSION

De ce qui précède, il ressort sans doute que la filière biocarburant est un système complexe. Il est caractérisé par un ensemble d'acteurs en interaction à différentes échelles spatio-temporelles et poursuivant des objectifs variés. Ils interagissent pour échanger divers types de ressources : biomasse qui est la matière première essentielle, les terres de culture, la main d'œuvre, les services (transport par exemple), les biocarburants, etc. Sa dynamique est influencée par plusieurs facteurs qui sont internes et externes - les facteurs socioéconomiques, les facteurs biophysiques et les facteurs politiques. L'impact de ces différents facteurs met en évidence la nécessité de la prise en compte des articulations qui existent entre la production des biocarburants, les autres activités de l'économie, l'environnement, les politiques et la dynamique sociale pour une analyse adéquate du système.

La multiplicité des acteurs, des niveaux de décision, des facteurs et les interactions avec les phénomènes externes et les impacts globaux des biocarburants font de l'approche système la méthode adéquate pour analyser la filière biocarburants. L'Analyse des Cycles de Vie (ACV) est l'une des approches système les plus utilisées pour évaluer les impacts de production des biocarburants. Le prochain chapitre de notre étude porte sur l'ACV appliquée dans le domaine des biocarburants.

Chapitre 2. L'analyse du cycle de vie des biocarburants

Ce chapitre s'intéresse particulièrement à l'application de l'ACV dans l'analyse de la viabilité environnementale et énergétique des biocarburants. Ainsi, la méthodologie ACV est définie et présentée dans ce chapitre. Ensuite, quelques travaux sur l'application de l'ACV dans l'agriculture en général et dans le biocarburant en particulier sont présentés. Enfin, quelques résultats d'analyses sont discutés.

1. L'ACV

DEFINITION

L'ACV est une méthodologie normalisée et standardisée (ISO, 2006) permettant d'évaluer l'impact d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie, c'est-à-dire du «berceau à la tombe ». Elle est basée sur une approche fonctionnelle et multicritères. Initialement utilisée pour analyser les processus industriels, l'ACV est de plus en plus utilisée comme un outil d'aide à la décision pour analyser l'impact de l'agriculture sur l'environnement en particulier les émissions des GES, la dynamique du carbone, etc. (Haas et al., 2000; Cowell and Clift, 2000 ; Haas et al., 2001; Brandão et al., 2010).

L'objectif de l'ACV est d'évaluer au niveau global un produit ou un processus afin d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux pour apporter des améliorations nécessaires. En plus d'être un outil d'évaluation des produits et des processus, l'ACV est aussi utilisée comme un outil de comparaison des choix alternatifs. L'objectif est d'analyser l'impact de plusieurs produits ou processus afin de faire un choix viable. Par exemple, l'ACV est utilisée par analyser l'impact environnemental et la qualité énergétique de plusieurs types de biocarburants et de biomasse (Bessou et al., 2011).

Reconnu comme un véritable, robuste et flexible outil d'aide à la décision, l'ACV est de plus en plus utilisée par des décideurs, des chercheurs et des acteurs locaux pour évaluer l'impact de leurs décisions et de leurs activités sur l'environnement.

LA MÉTHODOLOGIE DE L'ACV

La méthodologie ACV se déroule en quatre grandes étapes (Figure 3) :

La définition des objectifs et de domaine d'étude : elle définit le domaine d'étude, les objectifs de l'étude, la destination de l'étude (à qui sont adressés les résultats ?) et la frontière de l'étude (par exemple, l'échelle d'étude). Les objectifs de l'étude sont par exemple, l'identification de l'impact d'un produit, la réduction de l'impact d'un produit sur l'environnement, le choix d'un produit par rapport à un autre, le choix d'une politique, etc. D'autres choix sont aussi opérés à cette étape. Il s'agit particulièrement du choix de la fonction des produits et de l'unité fonctionnelle. Une unité fonctionnelle est la fonction de référence à laquelle sera ramené l'ensemble des impacts quantifiés

pour un produit permettant ainsi de comparer plusieurs produits. Une unité fonctionnelle peut être par exemple estimée en tonne de CO₂ par ha.

Analyse de l'inventaire du cycle de vie : L'objectif principal est de collecter des données nécessaires pour atteindre les objectifs définis à l'étape précédente. Elle consiste à inventorier tous les flux (économiques et environnementaux) à l'intérieur et à l'extérieur du système.

Analyse des impacts : l'objectif est de transformer les flux inventoriés à l'étape précédente en une série d'impacts. Ces impacts sont calculés en fonction de l'unité fonctionnelle permettant une comparaison de plusieurs produits ou services alternatifs. Ces flux vont être agrégés dans des catégories d'impacts pour ensuite donner des indicateurs de catégorie (effet de serre, trou dans la couche d'ozone, smog, acidification, eutrophisation, toxicité, santé humaine, diminution des ressources, usage des terres, usage de l'eau).

Interprétation : elle permet de définir des conclusions sur les résultats des analyses et de mettre en évidence les limites de l'étude.

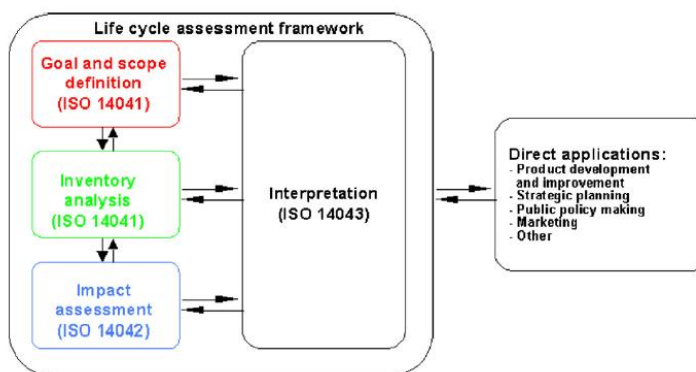


FIGURE 3: LE CADRE D'ANALYSE AVEC L'ACV

Plusieurs catégories d'impacts sont prises en compte dans une ACV. Il s'agit principalement de

1. l'effet de serre
2. l'épuisement des ressources naturelles
3. la diminution de la couche d'ozone
4. la toxicité humaine
5. l'écotoxicité
6. la pollution photochimique
7. l'acidification
8. l'eutrophisation
9. la consommation en eau

Notre étude porte sur l'application de l'ACV à la production et l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques qui a un lien très important avec l'agriculture. En Agriculture, l'ACV est souvent utilisée pour :

1. évaluer l'impact environnemental des pratiques agricoles et de l'élevage (Brandão et al., 2010; FAO, 2010; Mattsson et al., 2000).
2. comparer différentes pratiques agricoles (Haas et al., 2001).

L'application des ACV dans l'agriculture prend en compte toutes les étapes de la production des produits c'est-à-dire de la préparation des sols jusqu'aux traitements des produits (Figure 4).

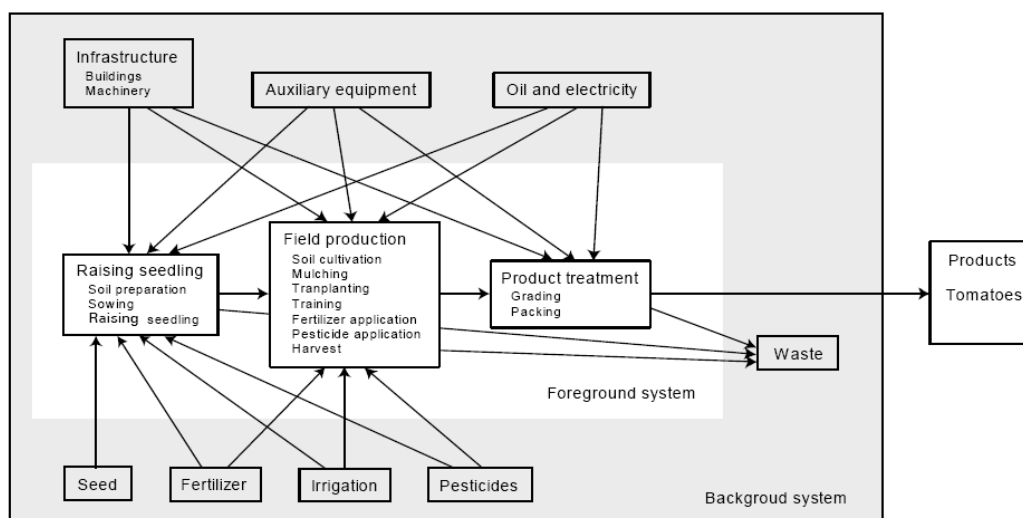


FIGURE 4: REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU PROCESSUS ACV EN AGRICULTURE: CAS DE LA PRODUCTION DES TOMATES (HAYASHI ET AL., 2006)

En fonction des objectifs de l'étude, différentes unités fonctionnelles peuvent être utilisées (Tableau 4): l'échelle de l'exploitation, l'unité de la surface exploitée, l'unité de bétail ou l'unité du produit exploité (tonne). Ces différentes unités fonctionnelles peuvent être utilisées dans une même étude (Haas et al., 2000) offrant ainsi la possibilité d'étudier les impacts environnementaux des différentes fonctionnalités de l'agriculture et de comparer différentes cultures ou de pratiques sous différents critères à différentes échelles (locale, régionale et globale).

TABLEAU 4: LES UNITÉS FONCTIONNELLES COURAMMENT UTILISÉES EN ACV-AGRICULTURE (HAAS ET AL., 2000)

Indicator / Impact category	Functional unit			
	Farm	Area [ha]	Livestock [LU*]	Product [t milk]
Global impact				
Primary energy (resource use)	X	X	X	X
P-fertiliser (resource use)	X	X		X
Emission of CO ₂ -equivalents (global warming potential)	X	X	X	X
Regional to international impact				
Emission of SO ₂ -equivalents (acidification)	X	X	X	X
N-balance (groundwater) P-balance (surface water)	X	X		(X)
Local to regional impact				
Biodiversity estimation score	X	(X)		
Landscape image score	X	(X)		
Animal husbandry score	X		(X)	

*LU livestock-unit (each 500 kg live-weight of cattle)

(X) restricted, only for certain indicators possible or in general not very meaningful

Plusieurs catégories d'impacts sont couramment prises en compte dans l'ACV appliquée à l'agriculture (Tableau 5). Ces catégories d'impacts permettent d'évaluer la viabilité d'une pratique agricole en termes de consommation des ressources, du réchauffement climatique, de la transformation de la structure biophysique des sols et de la sauvegarde de la biodiversité.

TABLEAU 5: LES CATÉGORIES D'IMPACTS ET LES INDICATEURS PRIS EN COMPTE DANS L'ÉTUDE

Les catégories d'impacts	Indicateurs	Références
Consommation des ressources		
De l'énergie	L'utilisation des fertilisants (P et K)	(Haas et al., 2000; Haas et al., 2001)
Des minéraux	L'utilisation de fertilisants organiques (C)	
Des ressources organiques		
Réchauffement climatique	Les émissions de CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	(Haas et al., 2000; Haas et al., 2001)
Les fonctions du sol		
	Carbone du sol (C stocké et perdu)	(Cowell and Clift, 2000 ; Brandão et al., 2010; Mattsson et al., 2000)
	Erosion : quantité de sol perdue	
	Structure physique : les pores du sol, etc.	
	l'hydrologie	(Haas et al., 2000; Haas et al., 2001)
	Quantité de P et de K (stocké et perdue)	
La biodiversité		
Production animale	Emission de CO ₂	(FAO, 2010)
	Production de fèces (C) et d'urine (N)	(Pitesky et al., 2009)
	Consommation de C	
	Production de viande	
	Production du lait	

De nombreuses études font état de l'application de l'ACV dans le domaine de l'agriculture (Tableau 6). A travers l'ACV, Haas et al. (2001) ont comparé l'impact de trois pratiques agricoles dans la région de Allgäu (Sud de l'Allemagne). Cette étude a montré que la culture extensive et organique comparées à la culture intensive réduirait l'utilisation de l'énergie, les émissions des GES et les effets négatifs de l'agriculture sur la qualité des eaux souterraines et la biodiversité. Brandão et al. (2010) ont comparé l'impact de différents systèmes d'usage des terres sur la séquestration du carbone du sol, les émissions des GES, l'acidification et l'eutrophisation. Les systèmes étudiés sont basés sur le colza, le miscanthus, le saule taillis à courte rotation et des résidus forestiers.

Cowell and Clift (2000) ont développé une méthodologie basée sur l'ACV pour évaluer l'impact de l'agriculture sur le sol. Cette méthodologie prend en compte plusieurs facteurs qui concernent la quantité du sol (l'érosion, l'incorporation) et la qualité du sol (les micro-organismes, les pathogènes, les nutriments du sol, le pH, la matière organique du sol, l'eau du sol, la texture, etc.).

L'ACV est aussi appliquée dans l'élevage. L'objectif est d'étudier l'impact environnemental de la production des animaux, de la viande et du lait (Basset-Mess, 2005; FAO, 2010). Le succès enregistré par l'application de l'ACV dans l'agriculture a permis l'application de l'ACV dans la production des biocarburants qui a un lien avec l'agriculture.

TABLEAU 6: QUELQUES CAS D'APPLICATION DE L'ACV DANS L'AGRICULTURE

Domaines d'application	Références principales
Impact de l'élevage sur les émissions des GES	(Pitesky et al., 2009; FAO, 2010)
Evaluation environnementale de la production porcine	(Basset-Mess, 2005)
Comparaison des systèmes de culture	(Haas et al., 2001)
Production des bioénergies	(Cherubinia et al., 2009; Davis et al., 2009; Bessou et al., 2011) Davis, Nikolijæ et al. 2009) (Ndong et al., 2009)
Production agricole	(Hayashi et al., 2006; Brandão et al., 2010)
Innovation technologique	(Davis et al., 2009)
Gestion de la matière organique du sol	(Haas et al., 2001; Brandão et al., 2010)
Erosion du sol	(Cowell and Clift, 2000)
Changement d'usage des terres	(Mattsson et al., 2000) (Baitz and Kreißig, 1999)

ACV - BIOCARBURANTS

Les objectifs de l'ACV-biocarburants sont de :

1. évaluer les impacts environnementaux (émission des GES, l'érosion des sol) et la qualité énergétique des biocarburants afin d'améliorer le processus de production (Cherubinia et al., 2009).
2. comparer plusieurs types de biomasses (Bessou et al., 2011) et des types de biocarburants.
3. comparer les biocarburants avec les carburants conventionnels (Ndong et al., 2009).
4. analyser différents scénarios de développement des biocarburants (Ndong et al., 2009).
5. analyser l'impact environnemental des changements d'usage des terres dus à la production des biocarburants.

L'application des ACV dans la production des biocarburants prend en compte toutes les étapes de production des biocarburants ; c'est-à-dire, de la production de la biomasse jusqu'à l'utilisation des carburants produits (Figure 5). A chaque étape sont considérés en entrée les énergies et les GES consommés et en sortie les énergies utilisées et les GES émis. En entrée, les énergies prises en comptes sont la main d'œuvre, la machinerie, l'essence, le diesel, l'azote, le phosphore, le potassium, la chaux, les semences, l'irrigation, les herbicides, les insecticides, l'électricité et le transport.

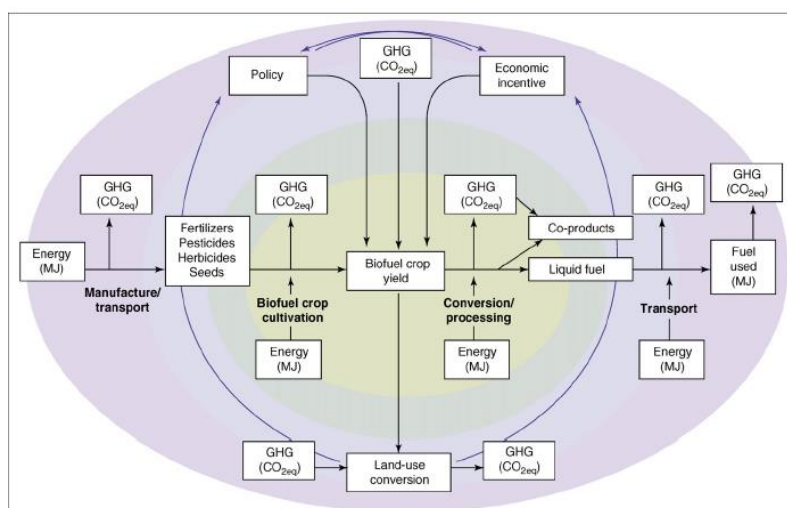


FIGURE 5: LE DOMAINE D'ÉTUDE DES BIOCARRURANTS EN ACV(DAVIS ET AL., IN PRESS)

Deux unités fonctionnelles sont couramment utilisées pour évaluer les biocarburants : les GES et l'énergie (Davis et al., In Press). L'évaluation des GES à toutes les étapes de la chaîne de production permet de mesurer l'impact des GES sur le réchauffement climatique. Les GES pris en compte sont le CO₂, le CH₄, le N₂O, etc. Pour évaluer l'impact global d'un biocarburant ou d'un type de biomasse sur les émissions des GES, les quantités de CO₂, CH₄, N₂O, etc. sont convertis en CO₂ équivalent, qui est l'unité commune utilisée pour comparer l'effet des GES. Certaines études prennent en compte la séquestration du carbone (Kim and Dale, 2011).

La définition (par exemple, en mégajoules) de l'énergie en entrées et sortie à travers la chaîne de production est importante, car ces unités se traduisent directement en besoins énergétiques d'origine anthropique. Deux méthodes sont couramment utilisées pour évaluer la performance énergétique du processus de production d'un biocarburant : la valeur énergétique nette (VEN) et le FER.

La valeur énergétique nette (VEN) est la différence entre la quantité d'énergie utilisable produite et la quantité d'énergie utilisée sur toute la chaîne de production. Ainsi, toutes les sources d'énergie utilisées sont prises en compte par la VEN. Une VEN négative signifie que la production du biocarburant consomme plus d'énergie que la quantité d'énergie utilisable produite comme carburant. Une VEN positive est une estimation de l'énergie obtenue. La VEN est évaluée comme suit :

$$NEV = l\text{é}nergie\ contenue\ dans\ le\ carburant + \\ l\text{é}nergie\ contenue\ dans\ l'énergie\ coproduit - \\ l\text{é}nergie\ consommée\ dans\ la\ phase\ de\ la\ production\ agricole$$

La seconde méthode d'évaluation de la performance énergétique des biocarburants est basée sur le rapport entre la quantité d'énergie produite et la quantité d'énergie fossile utilisée (FER). Contrairement à la VEN qui considère toutes les sources d'énergie, le FER permet d'évaluer le bénéfice acquis de l'utilisation de l'énergie fossile pour la production d'un biocarburant.

Un FER inférieur à 1 signifie que la production du biocarburant utilise plus d'énergie qu'elle en produit. Un FER égal à 1 signifie que la quantité d'énergie produite par le biocarburant est la même que celle utilisée pour sa production. Un FER supérieur à 1 signifie que l'énergie produite par le biocarburant est supérieure à celle utilisée pour sa production et donc rentable du point de vue énergétique.

LES RÉSULTATS DE L'ACV BIOCARBURANTS

LES ÉMISSIONS DES GES

A l'exception de quelques études, la plupart des études ont montré une réduction significative nette des émissions de GES et la consommation d'énergie fossile lorsque les biocarburants de transport, les plus couramment utilisés, (bioéthanol et le biodiesel) sont utilisés pour remplacer le diesel conventionnel et l'essence (Cherubinia et al., 2009). Suite à une étude sur le jatropha menée en Afrique de l'Ouest, Ndong et al. (2009) montrent que le biodiesel issu du jatropha permettrait de réduire de 72% les émissions des GES dues à l'utilisation du diesel conventionnel et serait plus performant du point de vue énergétique. Les résultats de l'étude réalisée par Ndong et al. (2009) montrent l'impact des rendements et des moyens de transport sur les émissions des GES. L'analyse d'un certain nombre de scénarios liés aux rendements montre qu'un rendement faible du jatropha augmenterait de 17% les émissions des GES et de 4% l'utilisation des énergies alors qu'un rendement élevé permettrait une réduction de 10% des émissions des GES et de 2% l'utilisation des énergies. En plus de la réduction des émissions des GES, la production de la biomasse énergétique favoriserait la séquestration du carbone du sol (Hamelinck et al., 2008).

Cependant, ces résultats dépendent de types de biocarburants, de la matière première utilisée et du système de référence (Tableau 7). Ainsi, la majorité des études montre que les biocarburants de

première génération comparés aux carburants conventionnels permettraient une réduction de 20 à 40% des émissions des GES (Fritsche, 2008). Alors que les biocarburants de seconde génération comparés au diesel conventionnel permettraient une réduction de 70 à 90%. Ces résultats ne tiennent pas compte des émissions du carbone dues au changement d'usage des terres. Au Brésil, l'éthanol produit à partir de la canne sucre réduirait de 82% les émissions des GES comparé aux carburants conventionnels. En France, l'éthanol produit à partir du Blé réduirait de 60% les émissions alors que l'éthanol produit à partir de la betterave à sucre réduirait de 52% les émissions. La comparaison entre le biodiesel et l'éthanol montre que le premier est plus polluant que le second.

D'autres études se sont intéressées à l'impact environnemental de l'utilisation de la biomasse et des déchets solides pour la production de l'électricité. Ces études montrent une réduction de 80 à 90% des émissions comparées au charbon ou au diesel (Fritsche, 2008).

Comme remarqué précédemment, l'impact environnemental des biocarburants est évalué depuis l'étape de production de la biomasse. La production de biomasse à des fins énergétique entraîne d'importants changements des modes d'usage des terres (la déforestation, l'affectation des terres de cultures vivrières aux cultures biocarburants, etc.) qui sont en partie responsables des émissions des GES. Ces impacts mettent en évidence la nécessité de la prise en compte de leur évaluation dans l'ACV appliquée aux biocarburants. La section suivante concerne l'analyse de l'impact des changements d'usage des terres.

TABLEAU 7: L'IMPACT DE L'ÉTHANOL ET DU BIODIESEL SUR LES ÉMISSIONS DE GES DANS DIFFÉRENTES RÉGIONS DU MONDE (BESSOU ET AL., 2011)

Biofuels	Regions	Feedstock	Co-product handling			GHG/MJ compared with fossil fuels
			Mass allocation (% applied to biofuels)	System expansion (substitutes)	Energy allocation (% applied to biofuels)	
Ethanol	Brazil + shipped to EU	Sugar cane		–		–66%
				Excess bagasse for heat (diesel)		–81.6%
	France	Wheat	DDGS (43) Straw 14% (96)	Straw 86% (IF)		–60%
			Sugar, pulps (80)	Crop residues, molasses, slop (IF)		–52%
		Wheat		DDGS as animal feed (feed wheat and soya meal) + straw (IF)		–14.3%
				DDGS as fuel + straw (IF)		–28.6%
			DDGS as feed (idem) + straw CHP		–62.7 %	
			DDGS as fuel + straw CHP		–77%	
	EU	Sugar beet		DDGS to biogas (fuel)		–60%
				Pulps to animal feed (soya meal)		–47%
				Pulps to animal feed (idem) + slops to biogas (fuel)		–65%
			Pulps + slops to biogas/heat (idem)		–80.5%	
USA	Maize		DDGS (soybean meal, corn for cattle feed) Corn gluten, meal and feed, corn oil (whole corn, nitrogen-in-urea, soy oil)	15% of net energy allocated to fossil fuel co-products	–14%	
Biodiesel	France	Rapeseed RME	Meal (46), acid oils (97), glycerol (88)	Crop residues (IF)	–70%	
		Sunflower SME	Meal (49), acid oils (97), glycerol (88)	Crop residues (IF)	–75%	

LES BIOCARBURANTS ET LES CHANGEMENTS D'USAGE DES TERRES

Les changements d'usage des terres dus aux activités humaines représentent 15 à 20% des émissions des GES (Smith et al., 2007). En plus des émissions, les changements d'usage des terres influencent la dynamique du carbone (Bationo et al., 2007). Ainsi, on observe d'importants flux de carbone dus au défrichage, à l'oxydation des matières organiques du sol, aux jachères, à la dynamique de la forêt, etc.

On distingue deux modes de changement d'usage des terres : le changement d'usage direct et le changement d'usage indirect. On parle de changement d'usage direct lorsqu'une espace précédemment utilisée à d'autres fins autre que la production agricole ou de biomasse est convertie en espace de production de biomasses énergétiques. On parle de changement d'usage indirect lorsque l'espace précédemment utilisée pour la production agricole (alimentaire) est convertie en espace de production de biomasse énergétique. Plusieurs facteurs influencent ces changements : (1) la démographie à travers son impact sur la production agricole et la demande en énergie, (2) la demande et les prix sur le marché des différents produits, (3) le développement technologique dont dépendent les pratiques agricoles et la transformation de la biomasse, (4) des politiques gouvernementales, et (5) les conditions agroécologiques.

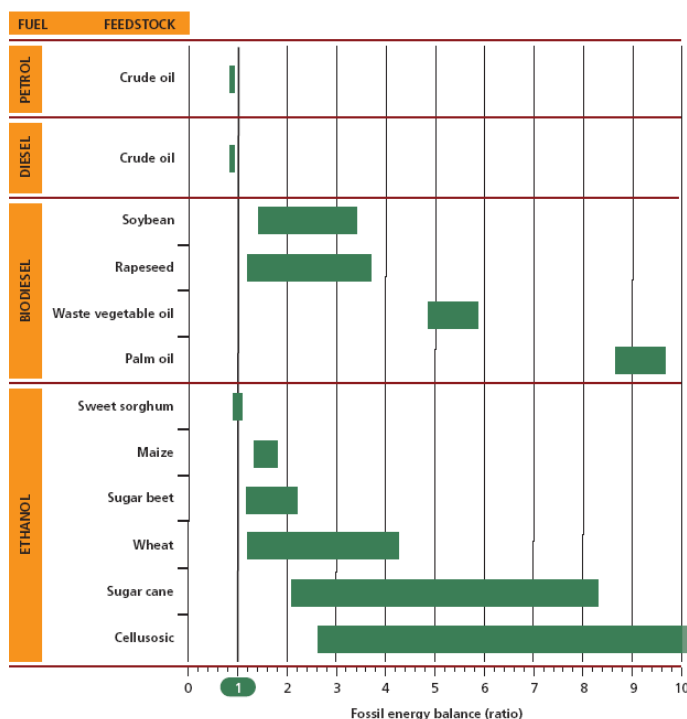
Des études montrent que le changement d'usage indirect émettrait plus des GES et causerait plus de perte du carbone que le changement d'usage direct (Fritsche, 2008; Searchinger et al., 2008; Liska and Perriny, 2009). Cela est particulièrement dû au fait que le changement d'usage indirect entraînerait une réallocation des terres affectées à la production de biomasse à différentes régions ou pays. En plus des émissions des GES, le changement indirect influencerait le marché mondial des grains à travers l'augmentation des prix, la diminution de la production des grains si une nouvelle surface équivalente ou supérieure n'est pas affectée à la production des cultures remplacées.

Cependant, les effets du changement d'usage indirect pourraient être réduits à travers diverses stratégies (Fritsche, 2008) : (1) l'amélioration des rendements des cultures qui permettrait de réduire le déplacement des surfaces, (2) l'intensification de l'agriculture traditionnelle qui réduirait les surfaces cultivées et libèrerait de l'espace pour la production de biomasse énergétique, (3) la production de biomasse sur des terres marginales ou en jachère qui permettrait de réduire le déplacement des surfaces et de favoriser la séquestration du carbone. L'usage de ces terres marginales nécessite d'évaluer leur impact socio-économique et agro-économique.

L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BIOCARBURANTS

Les résultats montrent que l'efficacité énergétique des biocarburants dépend de la matière première, de la technologie de transformation, du type de biocarburant et de la zone d'étude (Tableau 8). Avec un FER compris entre 2,30 et 10, les biocarburants de troisième génération seraient supérieurs aux biocarburants de 1^{ère} et de 2^{nde} génération. De façon générale, l'efficacité énergétique des biocarburants serait supérieure à celle des carburants d'origine fossile.

TABLEAU 8: TABLEAU COMPARATIF DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BIOCARBURANTS ET DES CARBURANTS D'ORIGINE FOSSILE (FAO, 2008)



CRITIQUES DE LA MÉTHODOLOGIE ACV

L'ACV présente plusieurs faiblesses pour prendre en compte toute la complexité d'un système tel que la production de la biomasse.

1. Les résultats de l'ACV sont dépendants du site et du temps de l'étude. La description précédente a mis en évidence le caractère dynamique et évolutif du système des biocarburants. Donc une analyse basée sur des situations présentes ou passées ne permet pas d'appréhender l'évolution future du système étudié. De surcroît, les impacts globaux du système nécessitent non pas l'existence d'une réalité mais une pluralité de réalités. Limités à un seul site étude et à une seule période d'analyse, les résultats de l'ACV ne sont pas réutilisables en dehors de la période et du site d'étude. L'état du développement des biocarburants qui ne couvrent que 10% du besoin énergétique mondial, nécessite aussi des études prospectives en plus des études basées sur des situations passées ou présentes. L'absence de la dimension temporelle dans l'ACV ne permet pas de faire des projections à long terme sur le système sous différents scénarios.
2. Les articulations entre les différents niveaux de décisions sont difficilement prises en compte dans l'ACV. A l'échelle de la région agricole, l'impact environnemental est supposé être égal à la somme des impacts de chaque exploitant (Payraudeau and van der Werf, 2005). En plus, les impacts environnementaux d'une culture donnée est évaluée en liant les émissions spécifiques à la somme des surfaces totales de la dite culture (Payraudeau and van der Werf, 2005). En effet, les résultats sont reportés à un seul niveau de description et n'intègrent pas le caractère hétérogène du système. Un système complexe tel que le

système biocarburant est caractérisé par une hétérogénéité de comportements et l'état global du système ne peut pas être réduit à la somme des comportements individuels. L'environnement est hétérogène. Il est caractérisé par plusieurs types de sol. Les pratiques agricoles et leurs impacts environnementaux dépendent en partie des conditions agroécologiques très variables dont la prise en compte nécessite une spatialisation de l'environnement.

3. Les facteurs socioéconomiques ne sont pas représentés dans l'ACV alors que la dynamique globale des systèmes étudiés en dépend. Par exemple, les changements d'usage des terres dépendent de la population qui influence la demande sur le marché, les prix, etc. Des tentatives d'intégration des facteurs socioéconomiques ont été réalisées en prenant en compte la main d'œuvre, le coût de production mais assez limitées pour prendre en compte toute la dimension socioéconomique.
4. Dans l'ACV classique, les effets externes du système étudié sont difficilement pris en compte. C'est le cas par exemple de l'analyse des changements d'usage indirect dont les impacts concernent le marché mondial des grains et la dynamique d'occupation des sols à l'échelle globale. L'ACV est plutôt adaptée à l'analyse des impacts du changement d'usage direct dont les effets sont localisés et contrôlés.

L'évaluation des différents impacts peut s'avérer complexe, vu la multiplicité des variables et des processus à prendre en compte. Cette complexité rend difficile voire impossible l'estimation de certaines données sur le terrain. Ainsi, des modèles de simulation sont utilisés pour quantifier ces variables qui sont ensuite utilisées pour compléter l'évaluation par l'ACV (Adler et al., 2007).

Les limites de l'ACV mettent en évidence la nécessité des modèles de simulation pour appréhender la dynamique du système dans toute sa complexité et de faire des projections à court et à long terme.

Chapitre 3. Des modèles pour analyser le système biocarburant

La modélisation de la production et de l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques connaissent un grand développement (Rajzgopal and Zilberman, 2007; Kretschmer and Peterson, 2010). Un modèle par définition est la représentation simplifiée d'un système. Il facilite la compréhension du système étudié, permet de réaliser des observations qui sont difficiles ou impossibles à réaliser dans la réalité et d'analyser le comportement d'un système sous différents scénarios. Ainsi, les modèles sont utilisés pour analyser la dynamique des ressources renouvelables, la dynamique de l'écosystème, l'impact environnemental des activités humaines, etc.

Dans le cadre de la production des biocarburants, les modèles de simulation vont permettre de représenter de façon exhaustive la dynamique des systèmes étudiés et de faire des projections à court, moyen et à long terme et d'analyser leur impact environnemental et socio-économique sous différents scénarios. De surcroît, ils fournissent un cadre adéquat permettant d'analyser les interactions entre la production de la biomasse à des fins énergétiques et les autres dynamiques tels que la production alimentaire, le changement d'usage des terres, le marché, etc. et les conséquences qui peuvent en résulter. C'est l'exemple des modèles d'équilibre général simulant les interactions entre les différents secteurs de l'économie à l'échelle régionale, nationale et mondiale. Les modèles de simulation sont réutilisables dans différents contextes contrairement aux ACV dont les résultats sont limités à un seul site. Ainsi, ils réduisent le coût d'investissement en termes de temps et de budget financier. Par exemple, le modèle IMPACT, un modèle d'équilibre général a été utilisé pour analyser divers scénarios dans différents contextes. Ces modèles ont l'avantage d'être évolutifs dans la mesure où on peut facilement intégrer de nouveaux facteurs telle que l'apparition d'une nouvelle technologie, la prise en compte d'un nouveau type de biomasse, etc.

En plus, les modèles de simulations peuvent être utilisés comme outils de dialogue entre les différents acteurs impliqués dans la filière biocarburants. Cela est particulièrement dû au fait qu'ils permettent d'intégrer les perceptions des différents acteurs et les articulations qui existent entre ces perceptions.

Ces modèles peuvent être classifiés en fonction de leurs objectifs, de leur échelle de description et de leur type. En fonction des objectifs, on distingue des modèles visant à :

1. analyser la viabilité économique des biocarburants (Tiffany and Eidman, 2003; Kwiatkowski et al., 2006; Khanna et al., 2008) ;
2. analyser la diffusion des technologies de production (Davis et al., 2009) ;
3. évaluer l'impact de la production de la biomasse à des fins énergétiques sur la sécurité alimentaire, l'économie ; le changement climatique, etc.

En fonction du niveau de description, nous distinguons des modèles à l'échelle individuelle basés sur la représentation des comportements individuels des agents, des modèles régionaux et des modèles

globaux destinés à l'analyse de l'impact économique de la production de la biomasse à différentes échelles.

En fonction de leur type, ces modèles peuvent être répartis en trois catégories:

1. les modèles à base d'individus ou à base d'agents basés sur la représentation des comportements individuels des producteurs, des transformateurs et des consommateurs ;
2. les modèles sectoriels qui ne s'intéressent qu'au système biocarburant avec une faible représentation des interactions avec les autres dynamiques ;
3. les modèles d'équilibre général qui prennent en compte les interactions entre le marché de la biomasse énergétique et les autres marchés à l'échelle régionale, nationale et internationale. Les modèles d'équilibre général cherchent à expliquer comment se fixent les niveaux de production, de consommation des biens et les prix dans une économie.

Plusieurs types de facteur sont pris en compte par les modèles de simulation : les prix des produits alimentaires, le revenu, l'accès à la terre, la main d'œuvre, les subventions, la séquestration du carbone, etc. Dans cette étude, nous nous intéressons aux modèles permettant d'intégrer les dimensions socioéconomique, biophysique et politique et s'appliquant à des systèmes à large échelle. Ce sont généralement les modèles sectoriels, les modèles d'équilibre général et les modèles basés sur l'intégration des modèles de différents types.

1. LES MODELES SECTORIELS

Les modèles sectoriels sont des modèles d'équilibre partiel. Ils permettent de représenter la dynamique d'un seul secteur de l'activité économique. Les influences globales du secteur et les influences des autres secteurs ne sont pas représentées.

QUELQUES MODÈLES SECTORIELS

LE MODÈLE IMPACT

Le modèle International Model for Policy Analysis of Agricultural Commodities and Trade (IMPACT) conçu par International Food Policy Research Institute (IFPRI) pour la projection de la demande et l'offre futures de produits agricoles, permet d'examiner les scénarios alternatifs pour la production alimentaire, la demande, le commerce, les prix et la sécurité alimentaire. Le modèle a été utilisé pour analyser l'impact de la production des biocarburants et des technologies de production sur les prix des produits alimentaires, la malnutrition et l'économie.

LE MODÈLE AGLINK-COSIMO

Le modèle AGLink-Cosimo est un modèle co-produit par l'OCDE et la FAO. Il est basé sur un couplage entre deux modèles : le modèle AGLINK et le modèle Cosimo. Le modèle AGLINK (Conforti and Londero, 2001) est destiné à l'analyse de l'agriculture des pays de l'OCDE. Sa base de données intègre les pays de l'OCDE, 4 pays non membres de l'OCDE (Chine, Argentine, Brésil, ???), et le reste

du monde. Le modèle COSIMO - développé par la FAO - représente le secteur agricole de plusieurs pays en voie de développement. Le couplage des deux modèles permet d'analyser les interactions entre les secteurs agricoles des pays développés, émergents et en voie de développement.

Le modèle montre l'impact de différentes politiques (réduction des taxes, les politiques tarifaires, les subventions, les politiques de substitution) sur les prix des biocarburants et les produits alimentaires. Comme limite, le modèle ne prend pas en compte le changement technologique et l'évolution des surfaces cultivées qui sont considérées comme fixes dans le modèle.

LE MODÈLE POLYSYS

Le modèle POLYSYS (De La Torre Ugarte and Ray, 2000) est un modèle national permettant d'analyser l'impact des politiques, de l'économie et de l'environnement sur le secteur agricole américain. Il intègre 14 produits agricoles et 4 produits de l'élevage. La structure du modèle est basée sur un modèle d'optimisation linéaire, un modèle économétrique (le modèle POLYSIM) et le modèle EPIC pour représenter l'impact environnemental de la production agricole. La production et la demande sont évaluées à l'échelle de la région agricole. Le modèle permet de prendre en compte les variations des conditions environnementales et économiques des différentes régions agricoles des USA. Le modèle a été utilisé pour analyser l'impact de la production de l'éthanol sur l'évolution des prix.

UN MODÈLE DE GENRE : LE MODÈLE DE ARNDT

Le modèle développé par Arndt et al. (2011) est l'un des rares modèles prenant en compte l'aspect social de la production des biocarburants. En Afrique, les femmes constituent l'une des couches les plus vulnérables de la société. Ces dernières offrent la force de travail essentielle au champ et participent à la gestion familiale. Cependant, elles ont un accès limité aux ressources (terres, crédits, etc.). Elles cultivent principalement sur les terres marginales pour assurer une partie de leur revenu et la consommation familiale. Ainsi, l'utilisation des terres marginales pour la production des biocarburants les rendrait plus vulnérables et réduirait la sécurité alimentaire.

L'objectif du modèle est d'analyser à travers un modèle d'équilibre partiel (1) l'impact des politiques et de l'intensification du travail des femmes sur la production des biocarburants et (2) l'impact de la production des biocarburants sur les revenus, l'usage des terres, la sécurité alimentaire, le développement économique à travers divers scénarios. Le modèle prend en compte plusieurs types d'activités économiques et de facteurs (Tableau 9).

TABLEAU 9: LES ACTIVITÉS ET LES FACTEURS PRIS EN COMPTE PAR LE MODÈLE

Activities	Maize; sorghum; rice; wheat; cassava; other roots; beans; vegetables; fruits; groundnuts; cashews; tea; tobacco; sugarcane; cotton; jatropha; other crops; cattle; poultry; other livestock; forestry; fisheries; mining; meat & dairy; other foods; milling; sugar refining; beverages; tobacco processing; textiles; wood products; petroleum; diesel; biodiesel; other fuels; chemicals; non-metals; metals ; machinery; transport
------------	---

	equipment; furniture & other manufacturing; electricity; water; construction; trade; hotels & catering; transport; communications; finance; business; public services; other services
Factors	Skilled male/female labor; semi-skilled male/female labor; unskilled male/female labor; land; capital
Households	Rural/urban per capita expenditure quintiles by male/female household-head

L'application du modèle en Mozambique montre qu'un investissement important dans les biocarburants favoriserait la croissance du PIB et la réduction de la pauvreté. Cependant, une forte implication des femmes dans la production de la biomasse entraînerait un important compromis entre la production des biocarburants et la sécurité alimentaire. Les simulations montrent également qu'une modeste amélioration du niveau d'éducation des femmes et l'amélioration des rendements des cultures permettraient d'assurer la sécurité alimentaire et de tirer profit de la production des biocarburants. Cependant, le modèle ne s'intéresse pas à la gestion foncière des terres qui conditionne l'accès et l'usage des terres en Afrique.

LES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL

Les modèles d'équilibre général sont couramment utilisés pour analyser l'impact des scénarios politiques sur l'économie. Ils ont l'avantage d'intégrer les interactions entre les différents secteurs de l'activité économique. D'autres avantages de ces modèles sont leur généricité et leur extensibilité. Dans le domaine de biocarburants, ces modèles sont utilisés pour analyser l'impact des politiques énergétiques, économiques et environnementales sur la production des biocarburants et vice-versa. Kretschmer and Peterson (2010) classifient ces modèles en trois catégories selon l'approche utilisée. La première approche modélise les biocarburants comme substituant au carburant fossile dans les processus de production industrielle (Burniaux and Truong, 2002; Dixon et al., 2007). Ces modèles ne désagrègent pas le secteur des biocarburants, ce qui ne permet pas d'analyser de façon explicite les interactions entre la production des biocarburants et les autres activités de l'économie. La seconde approche est basée sur la modélisation des technologies latentes. Ce sont des technologies qui existent mais non actives dans la période de base du modèle et non profitables du point de vue économique. Ces modèles permettent de faire des projections dans le futur en faisant des hypothèses sur l'évolution technologique. La troisième approche désagrège le secteur biocarburant à travers des bases de données générales (Birur et al., 2008). Les modèles basés sur cette approche offrent la possibilité d'analyser les interactions entre la production des biocarburants et les autres activités de l'économie.

Cependant, basés sur un seul niveau description, ces modèles ne permettent pas d'analyser les articulations qui existent entre les options locales et globales. Il est impossible d'analyser comment le niveau individuel influence le niveau global.

QUELQUES EXEMPLES DES MODÈLES D'ÉQUILIBRE GÉNÉRAL

LE MODÈLE GTAP-E

Le modèle GTAP-E (Burniaux and Truong, 2002) est un modèle d'équilibre général basé sur une extension du modèle GTAP. Il intègre la substitution des carburants par les biocarburants, les émissions des GES dues à la combustion des carburants et le marché carbone.

LE MODÈLE USAGE

Dixon et al. (2007) analysent l'impact économique de la substitution du pétrole par des biocarburants.

DES MODÈLES DE CHANGEMENTS D'USAGE DES TERRES

Le changement d'usage des terres est dépendant du marché mondial (la demande des produits remplacés, leur disponibilité sur le marché, les prix), des facteurs biophysiques et du temps (les itinéraires techniques, les systèmes de rotation) et a des impacts au niveau global (Gnansounou et al., 2008). Des modèles dynamiques globaux sont nécessaires pour prendre en compte ces différents facteurs et analyser leur évolution sous différents scénarios socioéconomiques, biophysiques et politiques.

De nombreux modèles de simulation ont été développés à cet effet (Keeney and Hertel, 2008; Searchinger et al., 2008; Kim et al., 2009; Melillo et al., 2009). Ces modèles ont pour objectif de comparer l'impact environnemental et économique du changement d'usage direct et indirect.

Ainsi, à travers un modèle d'équilibre général, Melillo et al (2009) montrent que les pertes en carbone dues au changement d'usage indirect seraient plus importantes que celles causées par le changement d'usage direct. La prédiction d'une utilisation accrue des fertilisants montre que les émissions de N₂O seraient plus importantes que les pertes en carbone. Kim et al. (2009) ont également montré que les émissions indirectes seraient plus importantes que les émissions directes. La transformation des terres vierges en espace de culture entrainerait une émission de 3,8 Pg de CO₂ équivalent sur 30 ans. Les résultats de Searchinger et al. (2008) montrent que l'impact du changement d'usage des terres dû à la production de biomasse ne concerne pas seulement les émissions des GES. Le remplacement d'un produit dans certains pays ou régions entrainerait la réallocation des nouvelles terres dans d'autres pays ou régions pour satisfaire la demande pour le même produit. Searchinger et al (2008) ont estimé que sur une période de 10 ans, l'allocation de 12,8 Mha de maïs pour la production de l'éthanol aux USA entrainerait une allocation de 10,8 Mha de nouvelles terres dans le monde.

LES MODÈLES MULTI-NIVEAUX

Les précédents modèles permettent d'analyser des composants situés à un même niveau de description. Ces modèles n'offrent pas de cadre adéquat pour analyser la dynamique du système du

niveau local au niveau global. Les modèles multi-niveaux visent à combler ces limites. L'avantage de ces modèles est leur capacité à intégrer différentes dimensions que nécessite l'analyse de la production des biocarburants ; c'est-à-dire les dimensions socioéconomiques, biophysiques et politiques. Contrairement aux modèles d'équilibre général, la plupart de ces modèles vont permettre de prendre en compte les articulations entre les options politiques globales et les options individuelles. C'est l'exemple du modèle DIMA (Obersteiner et al., 2006; Rokityanskiy et al., 2007) basé sur un couplage SIG, un modèle de foresterie et le modèle MESSAGE. A travers un couplage entre un modèle multi-agents et un SIG, Scheffran and BenDor (2009) étudient les conditions environnementales et économiques nécessaires à l'introduction de la culture des biocarburants dans l'Illinois. Davis et al. (2009) comparent différentes technologies de transformation en utilisant un couplage SMA-ACV.

LE MODÈLE DIMA

Le modèle DIMA (Obersteiner et al., 2006; Rokityanskiy et al., 2007) est un modèle global destiné à l'analyse des politiques visant à inciter les propriétaires à changer les modes d'usage des terres et des modes de gestion enfin de favoriser la séquestration du carbone, de réduire la déforestation tout en garantissant la sécurité alimentaire et la production de biomasse à des fins énergétiques.

L'approche utilisée est basée sur un modèle intégré dynamique de la foresterie et du changement d'usage alternatif des terres spatialisé et couplé avec plusieurs types de modèles. La dynamique de la forêt est simulée à travers un modèle global de végétation – le modèle TsuBimo. Il permet d'estimer la production nette primaire globale en se basant sur les données de la productivité primaire nette existantes, les données géophysiques globales, et des données de végétation et du climat. Le système énergétique est représenté par le modèle MESSAGE. Le modèle MESSAGE est un modèle d'optimisation destiné à l'analyse des systèmes énergétiques et des politiques énergétiques et à l'élaboration des scénarios de développement. Il intègre toute la chaîne d'un système énergétique c'est-à-dire de la production de la matière première essentielle jusqu'à l'utilisation de l'énergie produite.

A travers ce couplage, le modèle DIMA permet de prendre en compte les interactions entre la dynamique de l'écosystème et les activités humaines. Les activités humaines sont basées sur les changements d'usage des terres dont dépendent les profits des agents. L'objectif des agents est de maximiser leur profit sous différentes contraintes socioéconomiques et biophysiques à travers différents modes de gestion ; l'objectif global étant de déterminer les modes de gestion permettant une meilleure séquestration du carbone, la réduction de la déforestation tout en garantissant la sécurité alimentaire et énergétique. Ainsi pour chaque site géographique, le modèle détermine le coût de la terre, le coût de production de la forêt en fonction de la productivité du site, la densité de la population et la santé économique, lesquels facteurs vont influencer les décisions des agents.

L'approche utilisée intègre les quatre dimensions qu'implique l'analyse des biocarburants: la dimension socioéconomique, la dimension politique et la dimension environnementale. La spatialisation du modèle offre la possibilité de prendre en compte les différences socio-économiques et agroécologiques entre les différentes zones d'étude.

LE MODÈLE DE SCHEFFRAN AND BENDOR

Scheffran and BenDor (2009) étudient les conditions environnementales et économiques nécessaires à l'introduction de la culture biocarburants à Illinois. Plus précisément, l'objectif est d'analyser (1) l'introduction de deux nouvelles cultures : le *Miscanthus* et le *Panicum Virgatum* et (2) la compétition pour l'usage des terres entre la culture biocarburant et la production agricole. Le modèle est basé sur un couplage entre un modèle à base d'agents et un SIG. Les agents ont pour objectif d'optimiser leur processus de production en choisissant les cultures énergétiques appropriées et en minimisant le coût de production sous différentes contraintes environnementales et économiques. Les facteurs environnementaux pris en compte dans le modèle sont : la qualité de sols, le climat, le coût de production, la production agricole. Les facteurs économiques intégrés sont le coût de production, les prix sur le marché, le coût de transport et la localisation des usines de transformation. L'approche utilisée permet de déterminer la disposition spatiale optimale des cultures en fonction de plusieurs facteurs : les subventions, les changements des coûts de transport, de la demande en culture et l'introduction d'une nouvelle usine de production de l'éthanol.

Grâce au couplage SMA-SIG, le modèle fournit un cadre adéquat pour simuler les interactions entre les dynamiques de l'écosystème et les activités humaines. En utilisant les SMA, il est possible d'analyser l'impact d'un agent sur le système et sur les autres agents (leurs choix) et vice-versa. Ils offrent la possibilité de prendre en compte l'hétérogénéité du système aussi bien au niveau individuel (comportement des agents) qu'au niveau environnemental (hétérogénéité agroécologique, socioéconomique, etc.).

UN MODÈLE BASÉ SUR LE COUPLAGE SMA-ACV

Davis et al (2009) proposent un modèle basé sur un couplage multi-agents et l'ACV pour comparer différentes technologies de transformation et la dynamique des réseaux d'interactions des agents. Trois types d'agents sont pris en compte dans le modèle : *TechnologyAgent* qui sont des compagnies propriétaires de technologies, *WorldMarket* connectant chaque *TechnologyAgent* au marché externe et *EnvironnementAgent* qui collecte les informations sur les émissions. Les *TechnologyAgent* interagissent à travers différents réseaux pour vendre leurs produits et acheter de la matière première. L'objectif de chaque agent est de maximiser son profit tout en minimisant ses émissions et l'utilisation de l'énergie. Le réseau d'interactions est dynamique. A chaque pas de temps, chaque agent détermine (1) les réseaux à travers lesquels il peut acheter de la matière première et vendre sa production et (2) évalue son impact sur les émissions des GES. L'ACV est utilisée pour évaluer les émissions des GES au niveau global et pour déterminer la contribution de chaque agent sur ces émissions. En fonction de sa contribution sur l'état de l'environnement, l'agent adapte son comportement.

Le couplage SMA-ACV réalisé dans le cadre de cette étude, offre un cadre adéquat pour représenter les interactions entre le niveau global et le niveau individuel. Le niveau global est représenté par l'ACV et le niveau individuel par les SMA. L'utilisation de l'ACV permet d'analyser l'impact de chaque agent au niveau global et les SMA représentent la manière dont les agents adaptent leur comportement individuel en fonction de l'état de l'environnement. En plus, ce couplage comble les

limites des ACV qui ne sont pas adaptées pour représenter les interactions entre entités à différentes échelles spatio-temporelles et la compétition entre plusieurs technologies ou pratiques (Tableau 10).

TABLEAU 10: COMPARAISON ENTRE L'ACV ET LES SMA

ACV	SMA
Statique	Dynamique.
Déterministe	Non-déterministe
Evalue au niveau global l'impact des actions individuelles.	Représentation du niveau individuel et émergence des propriétés communes au niveau global.
Impossibilité d'analyser l'impact de l'action d'un agent sur les autres agents	Prise en compte des interactions entre agents à différentes échelles
Pas de prise en compte de l'environnement	Représentation explicite de l'environnement et ses interactions avec les agents u système
Absence de la dimension sociale et économique	Capacité d'intégration de la dimension sociale et économique
Permet de déterminer le point d'amélioration d'un procédé	L'évaluation de l'impact des actions est réalisée sur l'ensemble d'un processus. Difficulté de déterminer les points d'amélioration d'un procédé

UNE MÉTHODE INTÉGRÉE POUR L'ANALYSE DE LA VIABILITÉ DES BIOCARBURANTS

Halog and Manik (2011) proposent un cadre méthodologique intégré pour analyser la viabilité de la filière biocarburants à différentes échelles (micro, méso et macro). Cette méthode prend en compte tout le cycle de la production des biocarburants c'est-à-dire de la production des matières premières essentielles jusqu'à la production de l'énergie en prenant en compte les facteurs sociaux, économiques et environnementaux. L'approche proposée est basée sur l'intégration de plusieurs méthodes (Figure 6): l'ACV pour la dimension environnementale, l'analyse du cycle de vie social pour la dimension sociale, le coût du cycle de vie (CCV) pour la dimension économique, la méthode d'analyse multicritères, les SMA pour représenter les réseaux, le SIG pour la représentation spatiale du système, etc.

L'approche proposée par Halog and Manik (2011) permet de bénéficier des forces des différentes méthodes pour représenter les dimensions socioéconomique, biophysique et politique. Cependant, cette méthode n'est qu'à sa phase conceptuelle. Et le couplage entre des méthodes de types différents peut s'avérer coûteux et difficile à maîtriser

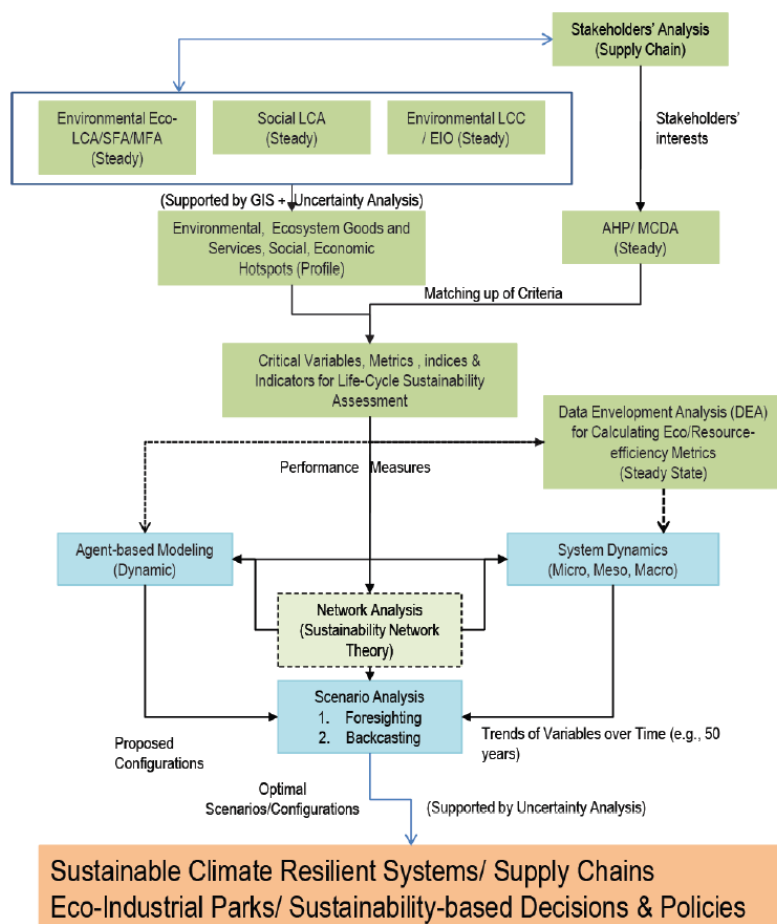


FIGURE 6: CADRE MÉTHODOLOGIQUE INTÉGRÉ DE L'ANALYSE DE LA VIABILITÉ DES BIOCARBURANTS (HALOG AND MANIK, 2011)

DISCUSSION ET CONCLUSION

DE LA NÉCESSITÉ DU COUPLAGE DE L'APPROCHE TOP-DOW ET BOTTON-UP DE LA MODÉLISATION DES BIOCARBURANTS

De ce qui précède, il ressort que les modèles de simulation destinés à l'analyse du système biocarburant sont basés soit sur l'approche top-down, soit sur l'approche bottom-up (Burniaux and Truong, 2002). L'approche top-down part de l'hypothèse que la compréhension du problème au niveau global permettrait de comprendre le comportement du système au niveau individuel. Elle est basée sur une description détaillée du niveau macro. Dans le cadre de la production des biocarburants, l'objectif est de déterminer la production individuelle qui permettrait d'atteindre les objectifs globaux (par exemple la demande du marché) qui sont déjà connus ou d'analyser l'impact des objectifs globaux sur le comportement des individus (par exemple, le revenu, la réduction de la pauvreté). L'avantage de cette approche est que les sorties du modèle peuvent être vues comme une réponse des individus aux différents scénarios socioéconomiques et politiques.

Quant à l'approche bottom-up, elle permet de comprendre le comportement global du système en faisant des hypothèses sur des comportements individuels des agents. Elle est basée sur une description détaillée des différents aspects qui caractérisent le système étudié : les technologies de production et de transformation, les modes de production et de changement d'usage des terres, etc. Dans le cadre de la production des biocarburants, l'objectif sera par exemple d'analyser le potentiel de production des biocarburants, de réduction des émissions des GES, et du développement économique en faisant des hypothèses sur les comportements des agents. Il s'agit généralement des modèles à bases d'individus. En général, ces modèles ne définissent pas explicitement les options globales. Il est impossible d'analyser comment les individus réagissent aux options globales et adaptent leur comportement.

Ces deux approches sont complémentaires lorsqu'on cherche à comprendre les articulations entre les options globales et les options individuelles. En d'autres termes, un tel couplage permettrait de comprendre comment la demande et les options politiques au niveau global influencent la stratégie des agents (par exemple le choix d'une technologie ou d'une culture) et comment les modes de gestion au niveau individuel influencent non seulement l'état général du système (par exemple, les émissions des GES) mais aussi l'orientation des politiques au niveau global. Cependant, un tel couplage soulève bien des questions informatiques et de modélisation qu'on peut résumer en ces termes :

1. comment définir les articulations entre les différentes échelles de décision ?
2. quel est l'ensemble des comportements individuels optimaux ou satisfaisant qui permet d'obtenir un comportement optimal ou satisfaisant au niveau global ?
3. Comment garantir la viabilité du système à différentes échelles de décision en tenant compte des points de vue des décideurs qui sont généralement globaux et les points de vue des acteurs locaux qui sont généralement individualistes même si on observe à ce niveau des prises de décision collective?

Dans notre étude, nous nous intéresserons au couplage entre ces deux approches en proposant un cadre méthodologique basé sur une approche intégrative de la simulation.

DE LA NÉCESSITÉ DE LA MODÉLISATION INTÉGRÉE DU SYSTÈME BIOCARBURANTS

De ce qui précède, il ressort sans doute que la modélisation offre un cadre adéquat pour l'analyse de la viabilité des biocarburants sous différentes dimensions socioéconomiques, politiques et biophysiques. Elle permet de rendre compte de la dynamique du système sous différents scénarios. A travers des scénarios économiques, sociaux, climatiques et énergétiques, les modèles de simulations permettent de faire des projections dans le futur et de prendre en compte des facteurs non actifs ou inexistants.

Les différentes approches de modélisation présentées montrent que l'approche intégrative de la modélisation permet de présenter de façon explicite les différentes dimensions de l'analyse des biocarburants. Parmi ces modèles, ceux basés sur l'approche multi-agents permettent une spécification explicite de la dynamique sociale et les articulations entre les options globales et les

options individuelles. En prenant en compte l'intégration de l'environnement, ces modèles permettent d'analyser les interactions entre les dynamiques sociales et environnementales. Le couplage SMA-ACV a montré la complémentarité entre ces méthodes. A travers l'ACV, les agents évaluent l'impact de leur action sur le système et adaptent leurs stratégies en fonction des objectifs individuels et globaux.

Mais, les modèles intégrés contrairement aux modèles d'équilibre général et les modèles sectoriels peinent à représenter de façon explicite les interactions entre le secteur des biocarburants et les autres activités économiques non agricoles. Une intégration des modèles à base d'individus et des modèles d'équilibre général offrirait un cadre adéquat pour l'analyse des interactions entre les dynamiques globales et locales.

Chapitre 4. Vers un cadre intégré pour la modélisation de la filière des biocarburants en Afrique

La biomasse est une ressource renouvelable dont la dynamique doit être appréhendée comme un système complexe. Son analyse nécessite de prendre en compte une triple complexité: celle de la dynamique sociale, celle de la dynamique écologique et celle des interactions entre ces deux premières dynamiques. Le système biocarburant est caractérisé par un ensemble d'acteurs en interactions à différentes échelles spatio-temporelles. Ces acteurs poursuivent des objectifs différents. Leurs actions sont influencées par le contexte dans lequel ils évoluent. A travers leurs actions, ils influencent l'état de l'environnement qui en retour les contraint à adapter leur comportement. En plus, les options globales telles que les taxes, les politiques de régulations, les politiques de développement économique et environnementales influencent le comportement des acteurs.

Le système biocarburant peut être vu comme un système hiérarchique du point de vue spatial et fonctionnel. Du point de vue spatial, la représentation du système va de l'échelle de l'exploitation à l'échelle nationale en passant par l'échelle du terroir villageois et régionale. Du point de vue fonctionnel, trois niveaux qui s'enchevêtrent dans les différents niveaux spatiaux caractérisent le système : le niveau de la viabilité du système, le niveau la production et de l'utilisation des biocarburants et le niveau englobant la dynamique sociale, économique et environnementale (Figure 7).

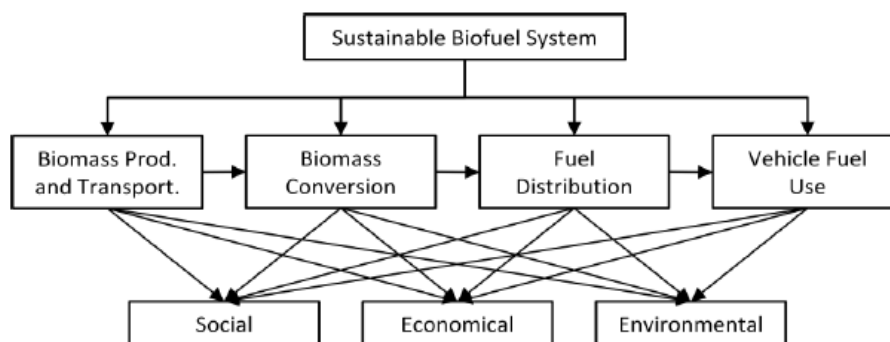


Figure 7: Représentation hiérarchique du point de vue fonctionnel du système (Halog and Manik, 2011)

La représentation d'un tel système ne répond pas à un seul formalisme de représentation. Ainsi les comportements individuels peuvent indifféremment faire appel à des processus d'optimisation des utilités comme de règles de comportements. Les interactions entre les individus et entre les individus et l'environnement sont eux plus facilement représentées par les systèmes multi-agents. Finalement le niveau global peut soit émerger des interactions locales soit se décrire plus globalement par des modèles à compartiments selon la stabilité du système ou le plus ou moins grand nombre des individus impliqués. Concernant la gestion, l'articulation entre les options au niveau global (réglementation, taxes, objectif de réduction des émissions des GES, les investissements) et l'impact au niveau des comportements individuels et ce qui peut effectivement en résulter demande

d'articuler ces deux niveaux de description. Ces articulations peuvent être réalisées à travers un couplage entre modèles individuels et modèles globaux.

De ce qui précède, il ressort sans doute que la modélisation de la production de la biomasse à des fins énergétiques nécessite un cadre méthodologique intégré basé sur le couplage de modèles de formalismes différents et la prise en compte des interactions à différentes échelles spatio-temporelles. Une telle approche fournit un cadre adéquat permettant d'intégrer à la fois les dimensions sociale, environnementale, politique et économique. En plus, elle offre la possibilité de prendre en compte de façon exhaustive la dynamique du système et constitue un cadre de dialogue entre les acteurs locaux, les décideurs et la recherche.

La modélisation d'un phénomène nécessite de prendre en compte un certain nombre de facteurs. Le choix des facteurs dépend des objectifs de la modélisation et du contexte de l'étude. La prochaine section détaille des facteurs importants qui caractérisent le contexte africain.

1. QUELS FACTEURS À CONSIDÉRER DANS LE CONTEXTE AFRICAIN ?

Notre étude porte sur la production des biocarburants en Afrique qui présente un contexte très différent des autres régions du monde. Des facteurs spécifiques doivent être pris en compte dans une activité de modélisation.

LA DYNAMIQUE DÉMOGRAPHIQUE

Au niveau social, elle doit intégrer la dynamique de la population. L'Afrique est l'un des continents qui a le plus fort taux de croissance. Cette croissance rapide influence le développement économique et le besoin énergétique. En plus, l'agriculture occupe plus de 80% de la population africaine. Avec le développement du milieu urbain, l'exode rural - synonyme du départ des bras valides - connaît un développement sans précédent. Ainsi, l'analyse de la production des biocarburants doit permettre d'étudier ses impacts sur l'exode rural et les migrations en milieu rural et l'impact de la croissance démographique.

LE GENRE

Les femmes font partie de la couche vulnérable de population africaine. L'un des objectifs des gouvernements étant de réduire la vulnérabilité des couches défavorables, il est important d'analyser l'impact des biocarburants sur la vulnérabilité des femmes et leur implication dans la production des biocarburants. Des travaux antérieurs ont montré l'impact de l'intensification du travail des femmes sur la production des biocarburants et de leur niveau d'éducation sur les revenus et la sécurité alimentaire (Arndt et al., 2011).

LE FONCIER

Deux modes de gestion des terres cohabitent en Afrique : le mode coutumier de la gestion des terres et la gestion administrative. L'accès aux terres de culture est très dépendant de la gestion

coutumière. Dans plusieurs régions africaines, seul le propriétaire d'une parcelle a le droit de planter des plantes pérennes. Les migrants qui généralement exploitent des terres appartenant aux autochtones ne peuvent cultiver que des cultures annuelles. La plantation des plantes pérennes est considérée comme un moyen d'appropriation des terres. Ce mode de gestion pourrait limiter la production des plantes comme le Jatropha et réduire le potentiel de production de la biomasse énergétique. L'importance du facteur foncier nécessite d'analyser les articulations entre les modes de gestion des terres et leurs impacts sur la production des biocarburants.

LA GESTION DES TERRES MARGINALES

La gestion des terres marginales : avec l'augmentation de la population, l'utilisation des terres marginales pour la production agricole prend de plus en plus de l'ampleur. Ces terres sont aussi utilisées par les femmes pour assurer une partie de leur revenu et la consommation familiale. Au même moment l'utilisation des terres marginales pour la production des biocarburants est encouragée par différents acteurs pour réduire la compétition avec l'agriculture pour l'accès à la terre. La prise en compte de la gestion des terres marginales dans la modélisation permettrait d'analyser les compromis entre leur usage pour la production des biocarburants et la production agricole.

LA GESTION DES RESSOURCES EN CARBONE

En Afrique sub-saharienne, la viabilité des systèmes de production est fortement dépendante de la gestion des ressources en carbone (Kowal and Kassam, 1978; Dixon et al., 2001). Les ressources en carbone constituent à la fois les biens de consommation et moyen de production. Elles contribuent à la consommation humaine et sont utilisées comme forage pour les animaux. Les ressources en carbone contrôlent la fertilité des sols et maintiennent les animaux qui fournissent des forces de travail. Il est donc nécessaire d'intégrer dans la modélisation la gestion des ressources en carbone dans l'analyse de la dynamique du système biocarburants. Ce qui permettrait d'analyser des compromis entre les objectifs de séquestration et de stockage de carbone d'une part et les objectifs de production énergétique d'autre part.

D'autres facteurs tel que la sécurité alimentaire et le développement doivent également être pris en compte.

QUEL TYPE DE MODÈLE ?

Pour prendre en compte les aspects précédemment cités, nous proposons un cadre conceptuel basé sur les formalismes suivants :

1. Un **SMA** pour représenter le niveau individuel et les interactions entre les dynamiques sociales et écologiques à différentes échelles spatio-temporelles. Il inclura la dynamique démographique, les changements d'usage des terres, l'impact des modes de gestion sur la dynamique biophysique (l'érosion du sol, les flux de nutriments de sols, les émissions des GES).

2. Un **modèle d'exploitation** pour représenter les règles de décisions des producteurs sous différents contextes socio-économiques, environnementaux, et politiques.
3. Un **modèle de culture ou de plante** pour simuler la dynamique des plantes en fonction des pratiques agricoles sous différents régimes climatiques.
4. Un **modèle de sol** pour simuler la dynamique biophysique (l'érosion, les flux de nutriments de sol, la dynamique du carbone, les émissions des GES, etc.)
5. Un **modèle d'équilibre général** pour prendre en compte les interactions entre les différentes activités à l'échelle nationale.
6. Un **système d'information géographique (SIG)** pour prendre en compte la diversité agroécologique des systèmes étudiés.

La méthode proposée permettra d'analyser l'impact des décisions des paysans sur leur revenu et la dégradation de l'environnement (les émissions des GES, les flux de nutriments de sols, la séquestration du carbone, la pollution, etc.) et l'impact des politiques sur la sécurité alimentaire, la production énergétique et sur les décisions des paysans (Figure 8).

Le cadre méthodologique sera un cadre générique du point de vue fonctionnel et du point de vue structurel. Du point de vue fonctionnel, le système pourra représenter divers systèmes (pays) de l'Afrique de l'Ouest. Du point de vue structurel, il fournira un ensemble d'artéfacts qui permettront d'intégrer différents modèles en fonction des objectifs de l'utilisateur. Ainsi, l'utilisateur pourra choisir lui-même des modèles appropriés à ses besoins et les intégrer pour réaliser des simulations. En plus d'être un cadre générique, le modèle servira d'outil d'évaluation et d'optimisation des politiques et un outil de dialogue entre des acteurs locaux, des décideurs et des chercheurs.

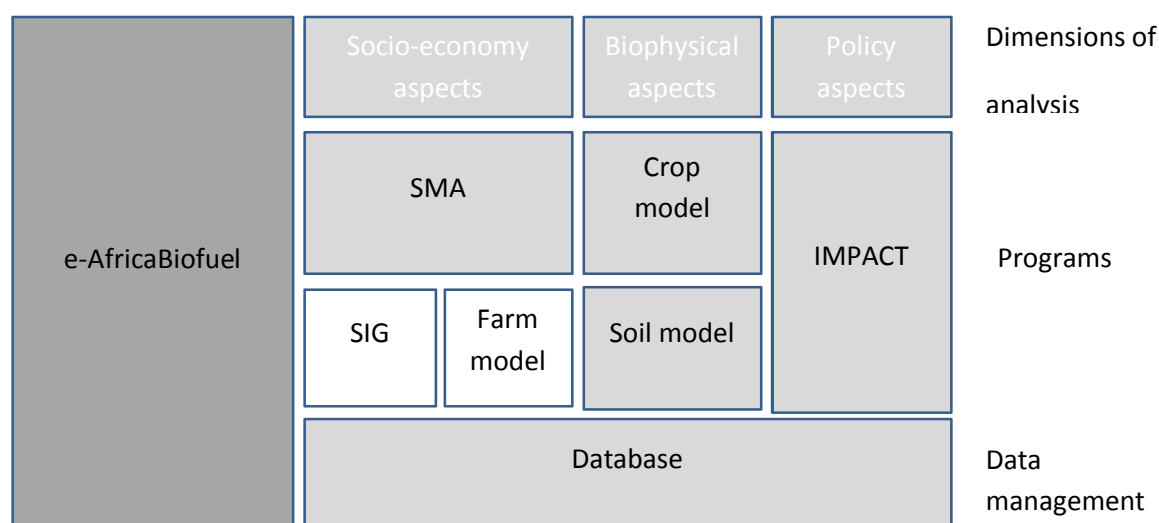


FIGURE 8: LA MÉTHODOLOGIE INTÉGRÉE POUR L'ANALYSE DES BIOCARBURANTS EN AFRIQUE

LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

L'approche multi-agents est fondée sur l'idée que l'on peut représenter tout acteur du monde par un agent, c'est-à-dire une entité informatique qui dispose de sa propre autonomie opératoire dans son

environnement (Ferber, 1995; Wooldridge, 2002). Réaliser des systèmes multi-agents revient à assembler ces agents afin de construire par simulation sur ordinateur (la simulation multi-agents) des micro-mondes artificiels semblables à des laboratoires virtuels d'expérimentations contrôlables et observables par les opérateurs. Capacité d'intégration et souplesse sont les principales qualités des SMA. Ceux-ci permettent d'intégrer une grande diversité de variables et de comportements, et de tenir compte du degré d'autonomie des acteurs et des caractéristiques de l'espace.

Dans un système multi-agents, les agents évoluent dans un environnement dynamique, complexe et imprévisible dont il est difficile de définir correctement à priori le fonctionnement. Pour s'adapter et réagir aux différents changements, les agents utilisent des actions individuelles ou collectives (coordination). Cette caractéristique des SMA peut être utilisée dans la gestion de l'écosystème, dont l'un des objectifs est l'étude des articulations entre les différents niveaux de décision (Le Bars, 2003; Abrami, 2004; Barreteau et al., 2004). En plus, les SMA intègrent des propriétés permettant de prendre en compte la dimension multi-échelle d'un système complexe (Gaud et al., 2008).

Dans cette étude, les SMA sont utilisés pour représenter (a) les interactions qui existent entre les dynamiques sociales et écologiques, (b) et l'impact des politiques globales sur les comportements des acteurs du système et (c) comme un complément aux ACV classiques. Le Tableau 10 fournit une comparaison SMA-ACV et met en évidence la nécessité d'un couplage entre ces deux approches.

VERS UNE APPROCHE PARTICIPATIVE

Comme signifié précédemment, l'analyse de la production de la biomasse nécessite de prendre en compte les dimensions sociale, économique, politique et environnementale. Chaque dimension implique au moins une discipline faisant de l'étude de la production de biomasse à des fins énergétiques une étude pluridisciplinaire. Ces différentes disciplines n'ont pas nécessairement les mêmes points de vue sur les objets réels du système étudié. Cependant, ces points de vue peuvent être complémentaires et nécessitent d'être intégrés pour une meilleure compréhension du système.

Le problème qui se pose est comment identifier et décrire ces points de vue disciplinaires ? Comment articuler ces points de vue pour construire un modèle cohérent ? Comment permettre aux différentes personnes impliquées dans le processus de modélisation (acteurs locaux, scientifiques, décideurs) d'avoir une compréhension commune du système étudié ?

La modélisation participative (Etienne, 2010; Voinov and Bousquet, 2010; Etienne et al., 2011) est adaptée à cet effet. Elle consiste au couplage des processus de production des connaissances scientifiques au processus de décision des acteurs locaux en construisant une représentation partagée du système cible et ses enjeux en utilisant la modélisation (Aubert et al., 2010).

Ainsi, dans le cadre de cette étude, nous proposons d'utiliser une approche participative engageant les chercheurs, les acteurs locaux et les décideurs. La méthodologie consistera à l'identification et à la description des points de vue de ces différents acteurs, à l'identification des scénarios à analyser, à la construction d'un modèle conceptuel générique, à l'implémentation du cadre intégré et aux simulations avec les chercheurs, les acteurs locaux et les décideurs. En un mot, il s'agira de la modélisation avec et par les acteurs. Cette approche garantit la cohérence du modèle et facilite son appropriation par ces derniers.

Comme cadre conceptuel, nous utiliserons le modèle OREA (Belem, 2009; Belem and Müller, 2009) destiné à la représentation multi-point de vue des systèmes complexes aussi bien au niveau global que local tout en prenant en compte la dimension environnementale.

CONCLUSION

Cette présente étude a permis de réaliser une synthèse bibliographique sur l'analyse de la production de la biomasse à des fins énergétiques à travers la méthodologie ACV et des modèles de simulation. A travers cette étude, il ressort que les ACV couramment utilisées pour analyser le cycle de vie d'un produit ou d'un processus n'offre pas un cadre adéquat pour prendre en compte toute la complexité d'un système et servir comme un véritable outil de prédiction du comportement d'un système sous différents scénarios. Les modèles de simulation basés sur la représentation simplifiée d'un système permettent de rendre compte de l'évolution de la dynamique du système étudié sous différents scénarios.

Ces différentes expériences montrent que les modèles de simulation sont mieux adaptés que la méthodologie ACV pour représenter de façon exhaustive la production de la biomasse à des fins énergétiques. Cependant, ces différents modèles sont complémentaires lorsqu'on s'intéresse à la représentation de toutes les dimensions (dimensions sociale, environnementale, économique et politique) qu'implique l'analyse des systèmes biocarburant. Cette complémentarité entre les différents modèles de simulations met en évidence la nécessité d'un cadre méthodologique intégré qui servirait d'outil de dialogue et de recherche pluridisciplinaire.

En perspectives, il s'agira de mettre en place un cadre méthodologique intégré permettant d'analyser la production des biocarburants à différentes échelles de décisions sous les dimensions sociale, économique, environnementale et politiques. Ce cadre est destiné à être utilisé comme un outil collaboratif permettant aux différents acteurs intervenant dans le système d'analyser l'impact de leurs décisions et d'identifier des scénarios innovants destinés au développement et à la valorisation de la production de la biomasse.

RÉFÉRENCES

- Abrami, G., 2004. Niveaux d'organisation dans la modélisation multi-agent pour la gestion de ressource renouvelables : Application à la mise en oeuvre de règles collectives de gestion de l'eau agricole dans la basse-vallée de la Drôme. Thèse de doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, France.
- Adler, P.R., Grosso, S.J.D. and Parton, W.J., 2007. Life-cycle assessment of net greenhouse-gas flux for bioenergy cropping systems. *Ecological Applications*, 17:675-691.
- Amigun, B., Musango, J.K. and Stafford, W., 2011. Biofuels and sustainability in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15:1360-1372.
- Arndt, C., Benfica, R. and Thurlow, J., 2011. Gender Implications of Biofuels Expansion in Africa: The Case of Mozambique. *World Development*, In Press, Corrected Proof.
- Aubert, S., Müller, J.P. and Ralihalizara, J., 2010. MIRANA: a socio-ecological model for assessing sustainability of community-based regulations. In: W.Y. David A. Swayne, Alexey A. Voinov, Andrea Rizzoli, Tatiana Filatova (Editor), *iEMSs Firth Biennial Meeting : International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2010)*, Ottawa, Canada, .
- Baitz, M. and Kreißig, J., 1999. Method to integrate land use in life cycle assessment, Stuttgart, Germany: IKP, Universitat.
- Barreteau, O., Bousquet, F., Millier, C. and Weber, J., 2004. Suitability of Multi-Agent simulations to study irrigated system viability: application to case studies in the Senegal River Valley. *Agricultural Systems*, 80:255-275.
- Basset-Mess, C., 2005. Propositions d'une adaptation des ACV aux systèmes de production agricole: Mise en oeuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine, AgroCampus Rennes, Rennes.
- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauve, B., Waswa, B. and Kimetu, J., 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 94: 13–25.
- Belem, M., 2009. A conceptual framework for multi-point of view analysis of complex systems. Application to the analysis of the carbon dynamics of village territories of the West African savanna. *Computer science and simulation*, Agro Paris Tech, France.
- Belem, M. and Müller, J.P., 2009. Toward a conceptual framework for multipoints of view analysis in complex system modeling: OREA model. In: Y. Demazeau, J. Pavon, J.M. Corchudo and J. Bajo (Editor), *7th International conference on PAAMS*. Springer, University of Salamanca (Spain), pp. 548-556.
- Bessou, C., Ferchaud, F., Gabrielle, B. and Mary, B., 2011. Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review. *Agron. Sustain. Dev*, 31:1-79.

- Birur, D., Hertel, T. and Tyner, W., 2008. Impact of biofuel production on world agricultural markets: a computable general equilibrium analysis.
- Blin, J., Weissman, N., Hanff, E. and Dabat, M.-H., 2010. Vers une stratégie nationale de développement des filières biocarburant: le cas du Burkina Faso. *Liaison Energie-Francophonie*, 87.
- Brandão, M., Canals, L.M. and Clift, R., 2010. Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA. *Biomass and energy*:1-14.
- Breuss, F. and Steininger, K., 1998. Biomass Energy Use to Reduce Climate Change A General Equilibrium Analysis for Austria. *Journal of Policy Modeling*, 20:513-535.
- Burniaux, J.M. and Truong, T.P., 2002. GTAP-E: an energy-environmental version of the GTAP model. *GTAP Technical Papers*:18-18.
- Cherubinia, F., Birda, N.D., Cowieb, A., ungmeiera, G., Schlamadingerc, B. and Woess-Gallasch, S., 2009. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*:434-447.
- Conforti, P. and Londero, P., 2001. AGLINK: The OECD partial equilibrium model, INEA.
- Cowell, S.J. and Clift, R., 2000 A methodology for assessing soil quantity and quality in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 8 321-331.
- Dabat, M.-H., 2011. Les nouveaux investissements dans les agrocarburants: quels enjeux pour les agricultures africaines ?
- Davis, C., Nikoli'c, I. and Dijkema, G.P.J., 2009. Integration of Life Cycle Assessment Into Agent-Based Modeling Toward Informed Decisions on Evolving Infrastructure Systems. *Journal of Industrial Ecology*.
- Davis, S.C., Anderson-Teixeira, K.J. and DeLucia, E., In Press. Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. *Trends in Plant Science*.
- De La Torre Ugarte, D.G. and Ray, D.E., 2000. Biomass and bioenergy applications of the POLYSYS modeling framework. *Biomass and Bioenergy*, 18:291-308.
- Demirbas, A., 2009. Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review. *Applied Energy*, 86:108-117.
- Desgain, X., 2005. Jusqu'où soutenir les biocarburants ?, etopia.
- Dixon, P.B., Osborne, S. and Rimmer, M.T., 2007. The Economy-Wide States of Replacing Crude Petroleum with Biomass. In: I. Purdue University (Editor), GTAP Conference.
- Dixon, J., Gulliver, A. and Gibbon, D., 2001. Farming Systems and Poverty. Improving farmer's livelihoods in a changing world. FAO - World Bank, Rome - Washington DC, 412 p.

Dixon, P.B., Osborne, S. and Rimmer, M.T., 2007. The economy-wide effects in the United States of replacing crude petroleum with biomass. *Energy & Environment*, 18:709-722.

Etienne, M., 2010. La modélisation d'accompagnement: Un démarche participative en appui au développement durable.

Etienne, M., Du Toit, D.R. and Pollard, S., 2011. ARDI: A Co-construction Method for Participatory Modeling in Natural Resources Management. *Ecology and Society*, 16.

FAO, 2008. The state of food and agriculture. Biofuels: prospects, risks and opportunities, FAO, Rome.

FAO, 2010. Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector: A Life Cycle Assessment.

Ferber, J., 1995. Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. InterEdition.

Fritsche, U.R., 2008. Bioenergy Life-Cycle Analysis: Beyond Biofuels.

Gaud, N., Galland, S., Gechter, F., Hilaire, V. and Koukam, A., 2008. Holonic multilevel simulation of complex systems: Application to real-time pedestrians simulation in virtual urban environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16:1659-1676

Gnansounou, E., Panichelli, L., Dauriat, A. and Villegas, J.D., 2008. Accounting for indirect land-use changes in GHG balances of biofuels. Review of current approaches, working paper, REF, 437.

Haas, G., Wetterich, F. and Geier, U., 2000. Framework in Agriculture on the Farm Level. *International Journal of LCA*, 5.

Haas, G., Wetterich, F. and Köpke, U., 2001. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 83:43-53.

Halog, A. and Manik, Y., 2011. Advancing Integrated Systems Modelling Framework for Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability*, 3:469-499.

Hamelinck, C., Koop, K., Croezen, H., Koper, M., Kampman, B. and Bergsma, G., 2008. Technical specification: greenhouse gas calculator for biofuel.

Hayashi, K., Gaillard, G. and Nemencek, T., 2006. Life cycle assessment of agricultural production systems: current issues and future perspectives.

Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S. and Tiffany, D., 2006. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103:11206-11210.

ISO, 2006. Environmental management - Life Cycle Assessment: Requirements and guidelines., International Organization for Standardization (ISO), Geneva.

- Keeney, R. and Hertel, T.W., 2008. The Indirect Land Use Impacts of U.S. Biofuel Policies: The Importance of Acreage, Yield, and Bilateral Trade Responses.
- Khanna, M., Dhungana, B. and Clifton-Brown, J., 2008. Costs of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois. *Biomass and Bioenergy*, 32:482-493.
- Kim, H., Kim, S. and Dale, B.E., 2009. Biofuels, land use change, and greenhouse gas emissions: some unexplored variables. *Environmental science & technology*, 43:961-967.
- Kim, S. and Dale, B.E., 2011. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel
- Seungdo Kim, Bruce E. Dale *Biomass and Bioenergy*, 29:426-439.
- Kowal, J.M. and Kassam, A.H., 1978. *Agricultural Ecology of Savanna : a Study of West Africa*. Clarendon Press, Oxford, UK, 403 p.
- Kretschmer, B. and Peterson, S., 2010. Integrating bioenergy into computable general equilibrium models -- A survey. *Energy Economics*, 32:673-686.
- Kwiatkowski, J.R., McAloon, A.J., Taylor, F. and Johnston, D.B., 2006. Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. *Industrial crops and products*, 23:288-296.
- Le Bars, M., 2003. Un simulateur multi-agent pour l'aide à la décision d'un collectif. Application à la gestion d'une ressource limitée agro-environnementale. Thèse de doctorat en Informatique, Université Paris-Dauphine, France.
- Liska, A.J. and Perriny, R.K., 2009. Indirect Land Use Emissions in the Life Cycle of Biofuels: Regulations vs. Science. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3 318–328.
- Magrin, G. and Dieye, P.N., 2007. Biofuels are also demanded for transport fuel to satisfy government consumption mandates or environmental regulations., *Conférence internationale: "Enjeux et Perspectives des biocarburants en Afrique"*, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Mattsson, B., Cederberg, C. and Blix, L., 2000. Agricultural land use in life cycle assessment (LCA): case studies of three vegetable oil crops *Journal of Cleaner Production*, 8: 283–292.
- Melillo, J.M., Reilly, J.M., Kicklighter, D.W., Gurgel, A.C., Cronin, T.W., Paltsev, S., Felzer, B.S., Wang, X., Sokolov, A.P. and Schlosser, C.A., 2009. Indirect emissions from biofuels: How important? *Science*, 326:1397-1397.
- Ndong, R., Montrejeaud-Vignoles, M., Saint Girons, O., Gabrielle, B., Pirot, R., Domergue, M. and Sablayrolles, C., 2009. Life cycle assessment of biofuels from *Jatropha curcas* in West Africa: a field study. *GCB Bioenergy*, 1:197-210.
- Obersteiner, M., Alexandrov, G., Benitez, P.C., McCallum, I., Kraxner, F., Riahi, K., Rokityanskiy, D. and Yamagata, Y., 2006. Global supply of biomass for energy and carbon sequestration from afforestation/reforestation activities. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11:1003-1021.

Payraudeau, S. and van der Werf, H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107:1-19.

Pitesky, M.E., Stackhouse, K.R. and Mitloehner, F.M., 2009. Clearing the Air: Livestock's Contribution to Climate Change. In: L.S. Donald (Editor), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 1-40.

Rajzgopal, D. and Zilberman, D., 2007. Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels, World Bank.

Rokityanskiy, D., Benitez, P.C., Kraxmer, F., Mccallum, I., Obersteiner, M., Rametsteiner, E. and Yamagata, Y., 2007. Geographically explicit global modeling of land-use change, carbon sequestration, and biomass supply. *Technological Forecasting & Social Change*, 74:1057-1082.

Rosegrant, M.W., 2008. Biofuels and grain prices: impacts and policy responses. , International Food Policy Research Institute, Washington,DC.

Scheffran, J. and BenDor, T., 2009. Bioenergy and land use: a spatial-agent dynamic model of energy crop production in Illinois. *International Journal of Environment and Pollution*, 39:4-27.

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

Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B.A., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., Howden, M., McAllister, T., Pan, G., Romanenkov, V., Schneider, U. and Towprayoon, S., 2007. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118:6-28.

Tiffany, D.G. and Eidman, V.R., 2003. Factors associated with success of fuel ethanol producers.

Valdes, C., 2007. Ethanol Demand Driving the Expansion of Brazil's Sugar Industry, Economic Research Service, United States Department of Agriculture.

Voinov, A. and Bousquet, F., 2010. Modelling withstakeholders. *Environmental Modelling&Software*, 25:1268-1281.

Wooldridge, M., 2002. An introduction to multiagent systems.

