



Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France

Note de synthèse
(Décembre 2002)

DONNEES ET REFERENCES

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie



PRICEWATERHOUSECOOPERS 

DIREM



Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants en France

Note de synthèse

Cette étude, mandatée par la Direction de l'Agriculture et des Bioénergies de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) et la Direction des Ressources Energétiques et Minérales (DIREM), concerne la mise à jour tant technique que méthodologique des bilans énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre des biocarburants et des carburants fossiles. Aucune considération de caractère économique n'a été prise en compte dans cette étude.

L'étude a été menée, au cours du premier semestre 2002, par Ecobilan, membre du Département Développement Durable du cabinet PricewaterhouseCoopers, avec le concours de l'Institut Français du Pétrole (IFP) et avec l'aide d'un comité de pilotage constitué d'un large panel d'experts désignés par l'ADEME et la DIREM.

Ce travail a permis de constituer une base de données actualisées et représentatives des filières françaises de carburants fossiles et de biocarburants : l'essence, le gazole, le MTBE, l'huile de colza, l'EMHV de colza, l'huile de tournesol, l'EMHV de tournesol, l'éthanol de blé, l'ETBE de blé, l'éthanol de betterave, l'ETBE de betterave.

Nous avons également cherché à tester l'incidence de certains choix méthodologiques sur les résultats établis dans le cadre des scénarios de référence. Ces tests ont porté principalement sur les hypothèses de stockage de carbone dans les sols et sur les émissions de N₂O associés aux apports d'azote.

Des scénarios prospectifs basés sur les progrès technologiques attendus dans les prochaines années ont également été étudiés pour estimer les potentiels d'amélioration des différentes filières.

Il convient de noter que :

- l'étude porte principalement sur un indicateur relatif à l'énergie non renouvelable mobilisée au cours des différentes étapes de production des produits, l'objectif de l'étude étant de comparer les performances de différents produits par rapport à la vulnérabilité des ressources énergétiques ;
- l'étude concerne les bilans du berceau de production au dépôt régional de distribution. Les résultats de cette étude n'intègrent pas l'étape de mélange et de combustion des produits. Néanmoins, à titre indicatif, cette étude présente également une estimation des bilans concernant l'étape de combustion des produits purs ;
- l'étude n'a pas retenu l'hypothèse du prélèvement négatif de CO₂ lors de la croissance des plantes. Le CO₂ émis lors de la combustion des produits issus de la biomasse ne contribuent donc pas à l'effet de serre.

Nous recommandons aux lecteurs du présent rapport de se reporter à la partie Limitations de l'étude, pour une meilleure interprétation et utilisation des résultats.

Les choix méthodologiques, les analyses et les résultats de cette étude sont détaillés dans le rapport technique. Les différentes données de base, les calculs et résultats intermédiaires sont présentés dans un rapport d'annexes. Il conviendra donc à chacun de se référer à ces deux rapports pour tout éclaircissement et complément d'information.

Les résultats des bilans concernant l'étude des filières actuelles montrent un bon positionnement de l'ensemble des filières biocarburants d'un point de vue bilan énergétique en comparaison avec les filières de carburants fossiles.

- En effet :
 - le rendement énergétique (énergie restituée / énergie non renouvelable mobilisée) pour les filières de production d'éthanol de blé et betterave est de 2 à comparer avec le rendement pour la filière essence de 0,87 ;
 - le rendement énergétique des filières ETBE de blé et betterave est voisin de 1 contre un rendement de la filière MTBE de 0,76 ;
 - enfin, les filières huiles végétales présentent un fort rendement énergétique de 4,7 pour l'huile de colza et 5,5 pour l'huile de tournesol, et proche de 3 pour les filières EMHV à comparer avec le rendement du gazole de 0,9.

En terme de bilan gaz à effet de serre, les filières de production de biocarburants présentent également un gain important par rapport aux filières de carburants fossiles.

- En effet, l'impact sur l'Effet de Serre de la filière essence est environ 2,5 fois supérieur à celui des filières éthanol en considérant l'hypothèse de combustion totale des carburants ce qui se traduit par un gain d'environ 2,7 teq CO₂ / t pour le scénario actuel. Le bilan gaz à Effet de Serre de la filière gazole est environ 5 fois supérieur à celui des filières huiles, soit un gain d'environ 2,8 teq CO₂ / t, et 3,5 fois supérieur à celui des filières EMHV, soit un gain de 2,5 teq CO₂ / t.

Les bilans concernant l'étude des filières actuelles permettent également de constater un bon positionnement actuel des filières tournesol et colza (huiles et EMHV) par rapport aux filières de production d'éthanol et d'ETBE de biocarburants.

Les tests de sensibilité démontrent que les hypothèses relatives à la prise en compte du stockage de carbone dans les sols au cours de l'étape de culture et aux émissions de N₂O à l'échelle de la parcelle impactent de manière significative les bilans gaz à effet de serre.

L'étude des scénarios prospectifs, à horizon 2009, souligne un fort potentiel d'amélioration des filières blé et betterave (en particulier pour l'éthanol) aussi bien d'un point de vue bilan énergétique que d'un point de vue bilan des émissions de gaz à effet de serre.

Les résultats détaillés des différents bilans sont présentés dans cette note de synthèse.

Présentation du comité de pilotage

Les principaux objectifs du comité de pilotage furent :

- de valider les choix méthodologiques,
- d'identifier les travaux antérieurs susceptibles d'être utilisés,
- d'identifier les interlocuteurs pouvant contribuer à la collecte des données,
- d'identifier les paramètres et scénarios technologiques devant faire l'objet de simulations, en particulier dans la perspective de développement de chacune des filières de production des biocarburants.

Le comité de pilotage, constitué de divers représentants désignés par l'ADEME et la DIREM, regroupe à la fois :

des institutionnels :

- M. Roy et M. Poitrat de l'ADEME, Direction de l'Agriculture et des Bioénergie
- M. Gaudillière et M. Charles du Ministère de l'Industrie, l'Economie et des Finances, direction des ressources énergétiques et minières (DIREM),
- M. Louis Meuric et Mme Thienard du Ministère de l'Industrie, l'Economie et des Finances, Observatoire de l'Energie
- M. Gourdon du Ministère de l'agriculture
- Mme Guillaume du Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement

des industriels :

- M. Allard de Bio Ethanol Nord Picardie,
- M. Crédoz du groupe Cristal Union, également Directeur de la Fédération des Coopératives de Betteraves
- M. Brinon de la société SAIPOL,
- M. Girard de TotalFinaElf
- M. Costes et Mme Le Borgne de PSA

et des centres techniques industriels et instituts techniques et de recherche :

- M. Staat du centre technique industriels des Professionnels de Corps Gras (ITERG),
- M. Cariolle de Institut Technique de la Betterave (ITB),
- Mme Lellahi de l'Institut Technique des Céréales et Fourrages (ITCF),
- M. Reau et M. Querré du Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains (CETIOM),
- M. Gosse de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA),
- M. His, M. Baudouin et M. Sigaud de l'Institut Français du Pétrole (IFP).

Contexte et objectif de l'étude

Dans le contexte européen actuel en matière de développement des énergies renouvelables et notamment du fait du projet de Directives européennes sur les biocarburants, la France, pays à dimension agricole importante au sein de l'Europe, doit se positionner vis-à-vis de la production et de l'utilisation de biocarburants.

C'est dans cette optique que l'ADEME et la DIREM se sont associées pour produire des bilans énergétiques et gaz à effet de serre, fiables, actualisés et représentatifs du cas français. Ces bilans ont porté sur :

- les principaux biocarburants produits et utilisés en France : éthanol et ETBE de blé et de betterave, huile et EMHV de tournesol et de colza ;
- les filières pétrolières classiques (essence, gazole et MTBE).

En effet, un état des lieux des performances quantitatives en terme énergétique et en terme d'impact sur l'effet de serre des filières de production des biocarburants s'avère aujourd'hui indispensable afin de mettre à disposition de l'ensemble des parties prenantes, des informations fiables et robustes, pouvant être intégrées dans leurs prises de décision.

Pour répondre à ces besoins, nous avons, dans un premier temps, procédé aux **bilans des filières actuelles, ci-après les scénarios de référence**. Dans un deuxième, il a été décidé de réaliser des **tests de paramètres, au travers de simulations** ou test de sensibilité de manière à évaluer l'impact de certains choix méthodologiques sur les résultats globaux. Enfin, de manière à évaluer les potentiels d'évolution des différentes filières, nous avons procédé aux **bilans de scénarios prospectifs** basés sur des évolutions technologiques attendues à horizon 2009.

Bilans concernant les biocarburants

- **Scénarios de référence** : réalisation des bilans représentatifs de la production actuelle en France.
- **Simulations** : réalisation de tests de sensibilité concernant les hypothèses :
 - la prise en compte du stockage de carbone dans le sol,
 - le choix des facteurs d'émissions de N₂O liés à l'apport d'azote,
 - la prise en compte de l'amortissement énergétique du matériel agricole.
- **Scénarios prospectifs** : prise en compte des évolutions technologiques probables à l'horizon 2009. Les principales évolutions attendues sont les suivantes :
 - améliorations des rendements des cultures et changements de pratiques culturales,
 - évolution de l'étape d'estérification pour les filières EMHV de colza et tournesol,
 - récupération du CO₂ issu de l'étape industrielle de fermentation pour les filières éthanol de blé et betterave,
 - amélioration du schéma énergétique de la distillerie pour les filières éthanol (blé et betterave),
 - utilisation de la paille de blé comme combustible au cours de l'étape de transformation industrielle de l'éthanol de blé.

Bilans concernant les carburants fossiles

- **Scénarios de référence** : réalisation des bilans représentatifs de la production en 2005 en France, avec les caractéristiques suivantes :
 - gazole avec les spécifications 2005 (50 ppm de soufre),
 - essence sans plomb 95 avec les spécifications 2005 (50 ppm de soufre),
 - MTBE aux caractéristiques actuelles.
- **Scénarios prospectifs** : L'essence et le gazole ont fait l'objet de deux scénarios prospectifs en tenant compte des spécifications 2009 (10 ppm de soufre). Ces scénarios ne prennent pas en compte les évolutions potentielles des procédés de raffinage, à l'inverse des scénarios pour les biocarburants. En effet, ces évolutions ont été jugées négligeables au cours du projet, au regard des évolutions dans l'approvisionnement des raffineries (origine et nature des combustibles) et du mix de production de produits de raffinages (dépendant de l'évolution de la consommation), qui sont eux pris en compte dans ces scénarios.

Organisation de l'étude

Conformément au souhait de l'ADEME et de la DIREM un large comité de pilotage constitué de différents intervenants de chacune des filières a été réuni autour de ce projet. Les principaux objectifs du comité de pilotage étaient :

- d'identifier les travaux antérieurs susceptibles d'être utilisés,
- de valider les choix méthodologiques,
- d'identifier les interlocuteurs pouvant contribuer à la collecte des données,
- d'identifier les paramètres et scénarios technologiques devant faire l'objet de simulations, en particulier dans la perspective de développement de chacune des filières de production des biocarburants,
- de valider les hypothèses de calcul.

La première étape du projet a été de dresser un état des lieux des sources de données existantes, pouvant aider la réalisation de ces nouveaux bilans en réutilisant les résultats des études déjà existantes. Cette première étape a permis de résumer les différentes méthodes utilisées et de dégager les principaux besoins d'actualisation et de collecte de données.

La deuxième étape du projet, la collecte et l'actualisation des données, menée en étroite collaboration avec les membres du comité de pilotage, a permis de réunir les données nécessaires à l'élaboration des bilans relatifs aux scénarios de référence.

Dans un troisième temps, différentes simulations et scénarios prospectifs prenant en compte des variantes technologiques attendues à l'horizon 2009 ont également été étudiés.

Méthodologie

L'élaboration des bilans suit la méthodologie normalisée des Analyses de Cycles de Vie (ACV)¹, limitée cependant au suivi de certains indicateurs énergétiques et de flux de gaz à effet de serre.

Dans le cas des biocarburants, Ecobilan a procédé à la modélisation des différentes étapes de production : les étapes agricoles, les transports et les étapes de transformations industrielles.

L'étude des carburants classiques s'est basée sur l'utilisation d'un modèle linéaire développé par l'IFP et modélisant le secteur du raffinage français.

Frontières du système étudié et unité fonctionnelle

L'étude a porté sur les frontières du système comprises entre l'extraction des matières premières et le dépôt régional de distribution. La frontière aval du système étudié est le dépôt avant distribution, que le produit soit ou non en mélange.

Les principales étapes des filières de production prises en compte sont les suivantes :

Carburants classiques	Biocarburants
Production du pétrole brut	Culture (consommations d'intrants et de carburants)
Transport du brut	Approvisionnement des usines de production des biocarburants
Raffinage	Transformation industrielle (consommations d'énergie, de matières premières et émissions de gaz à effet de serre) Synthèse des produits EMHV et ETBE (prise en compte de la production du méthanol et de l'isobutène)
Distribution depuis la raffinerie jusqu'au dépôt de distribution	Transport des produits jusqu'au dépôt avant distribution

L'unité fonctionnelle étudiée correspond à l'unité énergétique de 1 MJ de produit. (éthanol, ETBE, huile, EMHV, essence, gazole, MTBE).

Sources des données

Les données concernant les filières agricoles ont été collectées auprès des instituts techniques agricoles, l'Institut Technique de la Betterave (ITB), le Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains (CETIOM) et l'Institut Technique des Céréales et Fourrages (ITCF).

Concernant les étapes de transformation industrielle, les données ont été réunies auprès des sites industriels sélectionnés par le comité de pilotage, à savoir :

- le site de BENP situé à Origny, pour la filière blé,
- le site de Cristal Union situé à Arcis sur Aube, pour la filière betterave,
- le site de SAIPOL situé à Grand-Couronne, pour les filières colza et tournesol.

Les données de synthèse de la coupe isobutène et de l'ETBE ont été fournies par TFE.

¹ Série de normes ISO 14040 à 43.

En ce qui concerne les carburants classiques, la collecte des données a été réalisée à partir de données bibliographiques pour les étapes de production du brut et les étapes de transport. Les données de l'étape de raffinage sont le résultat d'une modélisation réalisée grâce au modèle linéaire de raffinage IFP.

Un tableau des principales données de référence (PCi, % C) utilisées pour les calculs est présenté en annexe de cette synthèse.

Règles d'allocation pour les co-produits

Conformément à la norme ISO 14040, la prise en compte des co-produits a suivi les deux règles suivantes :

- **Extension des frontières du système** : la substitution des impacts évités des produits valorisés. Cette règle a été retenue dans l'étude pour les produits enfouis ou épandus sur les parcelles agricoles,
- **Imputation ou allocation basée sur une règle physico-chimique** : l'imputation massique a été retenue. Cette règle a été retenue dans le cas des différentes étapes industrielles, lorsque le procédé conduit à produire, outre le produit intéressant l'étude, un autre produit qui est également valorisé (valorisation en alimentation animale ou valorisation industrielle).

Amortissement du matériel

L'énergie liée à l'immobilisation des matériels agricoles et matériels industriels, dite énergie d'amortissement (à savoir les constituant des machines qui peuvent être amortis au nombre d'heure de durée de vie de chacune des machines) n'a pas été prise en compte pour l'établissement des bilans pour un souci d'homogénéité entre les filières (biocarburants – carburants classiques).

En revanche, d'après le « Référentiel pour les bilans énergétiques des cultures agricoles », il apparaît intéressant de quantifier cette énergie d'amortissement pour les machines agricoles, celles-ci ayant une durée de vie relativement limitée : cette énergie d'amortissement a donc été intégrée dans les bilans dans le cadre des tests de paramètres afin d'évaluer l'incidence de cette prise en compte dans les bilans pour les filières biocarburants.

Limitations de l'étude

La lecture et l'utilisation des résultats de la présente étude nécessite des précisions concernant les principaux choix méthodologiques qui ont été retenus.

Bilan des produits, du berceau de production, au "dépôt régional de distribution"

Les frontières de l'étude intègrent l'ensemble des étapes de production et de transformation des produits étudiés, jusqu'au dépôt de distribution.

La phase de combustion des produits, en particulier dans un véhicule, n'est pas intégrée aux résultats. L'étude n'intègre pas le bilan énergétique de l'opération de réalisation du mélange, lorsqu'il y a mélange, et donc le contenu énergétique du mélange. Seule l'énergie du produit faisant l'objet de l'étude est prise en compte, et non pas l'énergie du produit en mélange.

A la demande du comité de pilotage et à titre indicatif, une estimation des émissions de gaz à effet de serre dans l'hypothèse d'une combustion totale des produits, basée sur leurs teneurs en carbone est également proposée dans les résultats.

Modélisation des émissions de CO₂ par les produits issus de la biomasse

Les produits issus de la biomasse captent du CO₂ par photosynthèse et le rejettent lorsqu'ils sont dégradés en condition aérobie. Il y a alors plusieurs façons de modéliser ce phénomène dans le cadre d'évaluation sur l'effet de serre. Dans le cadre de cette étude, il a été retenu :

- de ne pas tenir compte de prélèvement négatif de CO₂ lors de la croissance des plantes,
- en contrepartie, de considérer que le CO₂ émis lors de la combustion de produits issus de la biomasse ne contribuent pas à l'effet de serre.

Ce point est important pour tout utilisateur des résultats de l'étude qui souhaiterait prendre en compte la combustion des produits dans un véhicule par exemple. Dans le cadre de cette étude, il ne faut pas considérer que le CO₂ issu de la combustion des produits dérivés de la biomasse contribue à l'effet de serre.

Le stockage du carbone par les productions agricoles

Si le stockage de carbone dans les forêts gérées durablement est un fait acquis, il apparaît que les cultures annuelles peuvent également contribuer au stockage de carbone et donc à la lutte contre l'effet de serre.

Des travaux sont en cours de finalisation sur le sujet au sein de l'INRA. D'après les résultats d'une étude récente réalisée par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) et l'ITCF (stockage du carbone et techniques de travail du sol en milieu tempéré : bilan de 30 années d'expérimentation en grandes cultures), il apparaît dans les conclusions de cette étude que l'augmentation moyenne de carbone dans le sol se situe entre 100 et 300 kg/ha/an, selon les techniques de simplification et leur durée de mise en œuvre.

L'étude précise que ces augmentations sont acquises pour l'essentiel durant les 20 premières années d'expérimentation. La question de séquestration du carbone dans le sol suppose à long terme, une pérennité de la mise en œuvre des techniques de simplification du travail du sol, le retour au labour annulant en peu de temps le bénéfice acquis.

Etant donné que la présente étude est une approche à long terme du point de vue du bilan gaz à effet de serre, et qu'il est difficile de conclure aujourd'hui à un stockage durable du carbone dans le sol à long terme (impliquant une pérennité des pratiques agricoles), l'hypothèse du stockage de carbone biomasse dans le sol n'a donc pas été retenue dans le cas des bilans des scénarios de référence.

En revanche, dans la mesure où la prise en compte du stockage de carbone biomasse est susceptible d'impacter significativement les bilans de gaz à effet de serre pour les biocarburants, il a été décidé de prendre en compte un stockage de 50 ou 200 kg de carbone par hectare et par an. Nous pensons en effet que le résultat de ces simulations s'avèrera utile dans le cas où il est démontré, dans l'avenir, que le stockage de carbone biomasse est un fait durable.

Emissions de N₂O à l'échelle de la parcelle agricole

Les émissions de N₂O constituent une source importante d'émissions de gaz à effet de serre à l'échelle des productions agricoles (en liaison avec l'apport d'N minéral). Ces émissions sont extrêmement variables selon la nature des sols. Des travaux sont en cours de finalisation sur ce sujet au sein de l'INRA. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu les meilleurs facteurs d'émission disponibles à ce jour. Il s'agit des facteurs d'émissions anglo-saxons proposés par SKIBA en 1996. Nous avons également tenu dans le cadre d'une simulation à utiliser les facteurs d'émissions fournis par l'IPPC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Il importe de savoir que l'échelle de variation de ces émissions peut être significative, en fonction des facteurs d'émissions utilisés. Les études en cours permettront d'affiner ces résultats.

Sources des données utilisées

Nous rappelons également que cette étude est basée sur des données fournies par les membres du comité de pilotage (présenté dans la partie suivante). Les calculs effectués pour chacune des filières de carburant ont également été revus et validés par les membres du comité de pilotage compétents sur ces filières.

Indicateurs retenus pour exprimer les résultats

Les résultats des bilans énergétiques et gaz à effet de serre sont présentés à la fois par unité énergétique de produit (MJ) et par unité massique (kg de produit). L'énergie primaire totale peut être divisée en énergie non renouvelable et en énergie renouvelable d'une part ; et en énergie combustible et en énergie matière d'autre part :

$$\begin{aligned} \text{Energie primaire totale} &= \text{Energie non renouvelable} + \text{Energie renouvelable} \\ &= \text{Energie combustible} + \text{Energie contenue dans la matière} \end{aligned}$$

- L'énergie primaire totale représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse, et l'énergie hydraulique,
- L'énergie non renouvelable inclut toutes les sources d'énergies primaires fossiles et minérales, comme par exemple, le pétrole, le gaz naturel, le charbon et le minerai d'uranium,
- L'énergie renouvelable inclut toutes les autres sources d'énergies primaires, majoritairement l'énergie hydraulique,
- L'énergie combustible correspond à la part de l'énergie primaire qui est consommée par les procédés dans le système étudié (par exemple la combustion de gaz naturel),
- L'énergie contenue dans la matière correspond à la part de l'énergie primaire contenue dans les matériaux entrant dans le système et non utilisés comme combustibles et mise à disposition.

L'énergie renouvelable de type solaire, l'énergie éolienne, les précipitations, l'énergie contenue dans le sol et celle directement apportée par le travail de l'homme ne sont pas comptabilisées. Pour les énergies renouvelables, ce choix est justifié par le fait que le stock avant et après le processus de production reste inchangé à l'échelle humaine.

Indicateurs du bilan énergétique

Le principal indicateur retenu pour exprimer les résultats correspond à la mobilisation d'énergie non renouvelable :

- la mobilisation d'énergie ne correspond pas forcément à la consommation au sens usuel du terme. En effet, dès lors qu'une ressource est prélevée (pétrole par exemple), elle est comptabilisée en tant qu'énergie mobilisée même si elle n'est pas encore brûlée et donc restituée sous forme d'énergie consommable. La combustion des produits ne modifierait pas les bilans que nous proposons (sous réserve qu'aucune source énergétique supplémentaire ne soit nécessaire à la combustion),
- l'énergie non renouvelable présente l'intérêt dans le cas des bilans énergétiques de pouvoir comparer les performances des produits par rapport à la vulnérabilité des ressources énergétiques.

Un autre indicateur de performance énergétique par unité de surface vient compléter l'analyse : il correspond à l'énergie restituée auquel on soustrait l'énergie mobilisée, le tout est alors ramené à la surface agricole utilisée. Cet indicateur a été utilisé pour les filières huile et éthanol. Notons que cet indicateur de performance énergétique par unité de surface tient compte des règles d'allocation appliquées au niveau des différentes étapes des filières.

Le détail de l'énergie non renouvelable « consommée » au cours des étapes du procédé de transformation est présenté en annexe.

Indicateurs du bilan gaz à effet de serre

Le bilan des émissions de gaz à effet de serre s'est limité au suivi de cinq flux suivant, à savoir :

- CO₂,
- CO₂ biomasse,
- CH₄ fossile,
- CH₄ biomasse,
- N₂O.

L'indicateur retenu pour cette étude correspond à l'impact de ces émissions en terme de potentiel d'effet de serre à 100 ans calculé à partir des coefficients fournis par l'IPCC et limité aux 5 flux suivis pour l'étude.

Le tableau suivant présente les coefficients utilisés dans le calcul de l'indicateur Effet de Serre Direct à 100 ans :

Flux	Coefficient IPCC, 2002 (g eq. CO ₂)
CO ₂	1
CO ₂ biomasse	0
CH ₄ fossile	23
CH ₄ biomasse	23
N ₂ O	296

Le CO₂ émis dans l'atmosphère lors de la combustion des produits issus de la biomasse ne contribue pas à l'indicateur effet de serre. En effet, le carbone ainsi émis avait été prélevé au préalable dans l'atmosphère par la plante lors de sa croissance.

En revanche, contrairement au CO₂ biomasse, ces émissions de CH₄ biomasse contribuent à l'effet de serre. En effet, la fixation de carbone par les plantes s'effectue sous forme de CO₂.

Indicateur du bilan matière

Un indicateur présentant la productivité par unité de surface en biocarburants sans tenir compte des allocations est fourni à titre indicatif en annexe. Cette productivité des différentes cultures correspond à la quantité de biocarburants produite par hectare.

Synthèse des résultats pour les scénarios de référence

Bilans énergétiques pour les scénarios de référence

		Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	1.15	0.489	0.488	1.32	0.979	0.979
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	48.7	13.1	13.1	46.4	35.1	35.1
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		0.873	2.05	2.05	0.760	1.02	1.02

		Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	1.09	0.214	0.183	0.334	0.316
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	46.7	7.95	6.88	12.5	11.7
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		0.917	4.68	5.48	2.99	3.16

Bilans gaz à effet de serre avant hypothèse de combustion pour les scénarios de référence

		Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	10.5	34.4	33.6	17.9	24.0	23.7
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	444	922	902	631	860	851

		Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	6.48	17.8	13.2	20.2	16.5
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	277	660	498	755	612

Bilans gaz à effet de serre avec hypothèse de combustion totale pour les scénarios de référence

Avec hypothèse de combustion totale des produits effectuée sur la base de la teneur en carbone

		Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	85.9	34.4	33.6	88.9	70.5	70.3
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	3 650	922	902	3 130	2 530	2 522

Avec hypothèse de combustion totale des produits effectuée sur la base de la teneur en carbone

		Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	79.3	17.8	13.2	23.7	20.1
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	3 390	660	498	888	745

Note :

- Pour une lecture avisée des résultats des bilans de gaz à effet de serre avant combustion, il est important de rappeler que la modélisation ne tient pas compte du prélèvement négatif de CO₂ par les plantes ; en contrepartie, il est considéré que le CO₂ émis lors de la combustion de produits issus de la biomasse ne contribue pas à l'effet de serre. L'avantage des biocarburants par rapport aux carburants fossiles n'est donc pas visible à cette étape du bilan.
- Le calcul des émissions après combustion est un calcul théorique, qui s'appuie uniquement sur le contenu en carbone des produits. Les produits issus intégralement de ressources agricoles, comme l'éthanol et l'huile, ne voient pas leur contribution à l'effet de serre augmentée (émissions de C issu de la biomasse). Pour les produits constitués partiellement de produits issus de la biomasse et de produits dérivés du pétrole (ETBE, EMHV) la combustion contribue partiellement à l'effet de serre, pour la part de produit dérivé du pétrole contenu dans le produit.

Analyse des résultats des scénarios de référence

Un des objectifs de l'analyse des bilans pour les scénarios de référence était d'identifier les contributions relatives des différentes étapes des filières de production.

En ce qui concerne les bilans énergétiques des filières biocarburants, il apparaît que :

- **L'étape de culture** contribue pour environ **70%** aux bilans des huiles de colza et tournesol et environ **40%** aux bilans des EMHV de colza et tournesol. En revanche pour les filières éthanol de blé et betterave, la culture contribue pour seulement **20%** au bilan énergétique.
- **L'étape de première transformation industrielle** (transformation du blé et de la betterave en éthanol ou transformation des graines de colza et tournesol en huile) contribue pour les filières éthanol de blé et betterave à environ **80%** du bilan. En revanche, pour les filières huiles de colza et huile de tournesol, la contribution de cette étape est d'environ **20%**.
- **L'étape secondaire de transformation** : L'estérification de l'huile contribue pour environ **40%** du bilan énergétique des EMHV ; en ce qui concerne les filières blé et betterave, la synthèse de ETBE à partir d'éthanol contribue à **80%** à la mobilisation d'énergie non renouvelable du fait des étapes de synthèse de la coupe isobutène et de l'ETBE.
- **Les étapes de transport** contribuent faiblement aux bilans énergétiques (<5%).

En ce qui concerne la filière de carburants classiques (essence et gazole), il apparaît que **l'étape de raffinage** représente un poids important dans le bilan à savoir **60%** du bilan énergétique de l'essence et **40%** du bilan énergétique du gazole. **L'étape d'extraction du pétrole** contribue pour **30%** au bilan énergétique de l'essence et **50%** au bilan énergétique du gazole. Les étapes de transport représentent environ **10%** des bilans énergétiques.

En ce qui concerne les bilans gaz à effet de serre, la répartition des contributions des différentes étapes est relativement semblable à celle des bilans énergétiques.

Synthèse des résultats pour les simulations

Analyse des résultats des simulations

Le stockage de carbone dans le sol

Le phénomène de stockage du carbone biomasse dans le sol lié à l'étape de culture n'a pas été considéré dans les scénarios de référence. Des simulations ont été effectuées afin d'évaluer l'impact qu'aurait sur le bilan gaz à effet de serre le stockage de 50 ou 200 kg de carbone par ha et par an. L'hypothèse du stockage de 200 kg par ha et par an pour la culture de betterave n'a pas été retenue car peu réaliste au vu de la composition des résidus de culture. Les résultats montrent que ce paramètre a une influence significative sur les résultats.

- Un stockage de 50 kg de carbone biomasse par ha et par an améliore **sensiblement** les bilans gaz à effet de serre pour les filières huiles et EMHV (**de 6 à 16%**).
- Un stockage de 200 kg de carbone par ha et par an améliore plus nettement le bilan gaz à effet de serre (amélioration de l'ordre de **30%** pour l'huile et l'EMHV de colza, de l'ordre de **50 à 65%** pour l'huile et l'EMHV de tournesol et de l'ordre de **15%** pour l'éthanol de blé).

Les facteurs d'émissions de N₂O liés à l'apport d'azote

Dans les hypothèses retenues pour les scénarios de référence, les facteurs d'émissions pris en compte sont des coefficients spécifiques pour chacune des cultures étudiées et sont issus de données anglo-saxonnes (Skiba, 1996). Ces données reposent sur un nombre très limité d'essais contrairement à celles préconisées par l'IPCC qui correspondent à des données globales. Les facteurs d'émissions de l'IPCC ont fait l'objet de simulations pour l'ensemble des filières biocarburant afin de tester l'impact de cette hypothèse. Il s'avère que la prise en compte des coefficients de l'IPCC **augmente de façon significative les émissions de gaz** à effet de serre des filières biocarburants : de l'ordre de **40 à 50%** pour les filières huile et EMHV de colza et de tournesol, de l'ordre de **10 à 20%** pour les filières éthanol et ETBE de blé. En revanche, pour les filières éthanol et ETBE de betterave, les bilans restent inchangés (évolution <1%).

La prise en compte de l'amortissement énergétique du matériel agricole

L'énergie liée à l'immobilisation du matériel agricole, dite énergie d'amortissement (matériaux constituant les machines amortis au nombre d'heures de leur durée de vie) n'est pas prise en compte dans les scénarios de références. Un test de sensibilité sur cette hypothèse a été effectué pour l'ensemble des filières biocarburants afin d'évaluer l'impact de cette hypothèse sur les résultats. Les résultats de ces simulations montrent que la prise en compte de l'énergie d'amortissement a une **influence négligeable (< 4%)** sur les bilans de l'énergie non renouvelable mobilisée et des émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble des filières de biocarburant.

Synthèse des résultats pour les scénarios prospectifs

Bilans énergétiques pour les scénarios prospectifs

	Essence 2009	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	ETBE Blé	ETBE Betterave
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	1,14	0,280	0,301	0,906	0,913
Energie non renouvelable mobilisée par kg	48,4	7,5	8,054	32,491	32,749
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée	0,879	3,57	3,328	1,104	1,096

		Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol	EMHV Colza prosp 2	EMHV Tournesol prosp 2
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	1.10	0.196	0.173	0.302	0.291	0.357	0.346
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	46.9	7.30	6.52	11.298	10.8	13.3	12.8
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		0.913	5.09	5.78	3.309	3.44	2.8	2.9

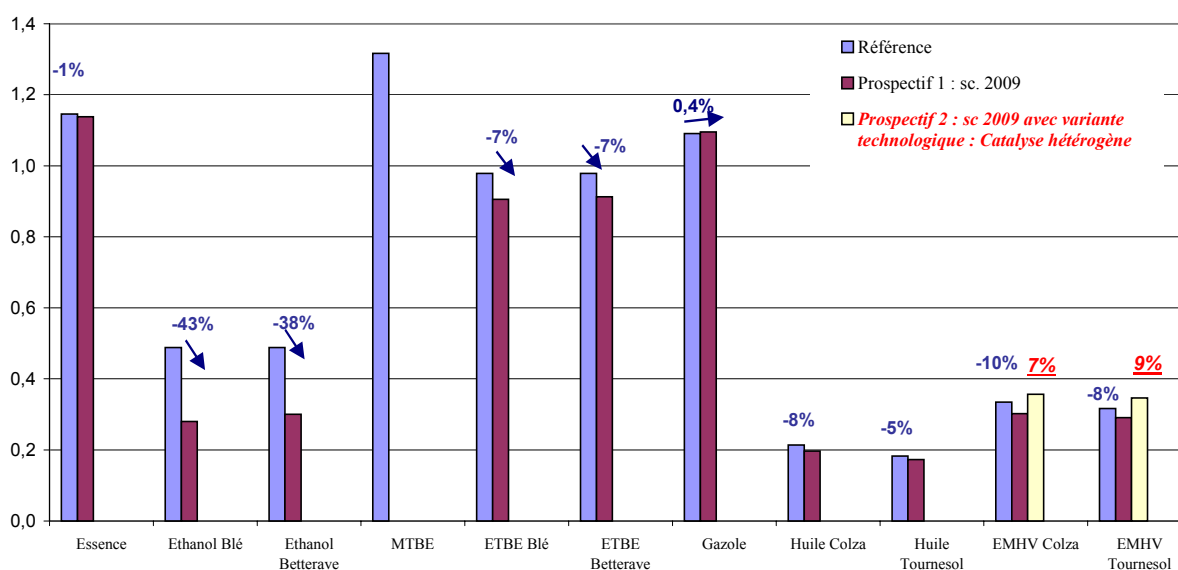
Note : dans le cas des filières EMHV de colza et tournesol, deux simulations prospectives ont été réalisées prenant en compte chacune une étape d'estérification différente de celle du scénario de référence.

Performance énergétique par surface (MJ/m ²)	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	Huile Colza	Huile Tournesol
Sc Référence	8.1	10.8	9.0	6.9
Sc Prospectif	19.6	31.4	10.0	7.4

Evolution de la performance énergétique par unité de surface des filières éthanol et huile

Note : cet indicateur de performance énergétique par unité de surface correspond à l'énergie restituée – l'énergie mobilisée, le tout ramené à une unité de surface. Il tient compte des règles d'allocation appliquées au niveau des différentes étapes des filières.

Energie non renouvelable mobilisée en MJ par MJ de produit restitué



Bilans gaz à effet de serre avant hypothèse de combustion pour les scénarios prospectifs

		Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol	EMHV Colza prosp 2	EMHV Tournesol prosp 2
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	7.89	16.2	12.4	17.6	14.6	21.0	18.1
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	338	601	468	657	541	785	668.9

Bilans gaz à effet de serre avec hypothèse de combustion totale pour les scénarios prospectifs

Avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone

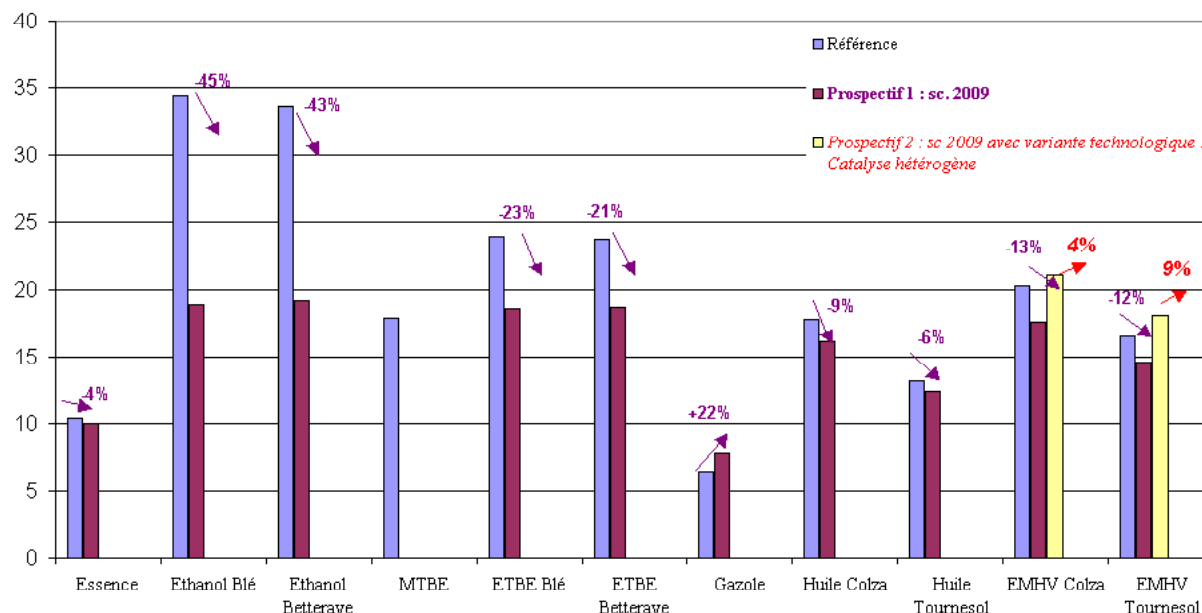
		Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	ETBE Blé	ETBE Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	85.5	18.9	19.7	65.1	65.4
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	3 635	505	527	2 336	2 346

Avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone

		Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol	EMHV Colza prosp 2	EMHV Tournesol prosp 2
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	80.7	16.2	12.4	21.1	18.1	24.6	21.7
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	3 454	601	468	787	671	922	805

Note : Le calcul des émissions après combustion est un calcul théorique uniquement qui s'appuie uniquement sur le contenu en carbone des produits. Les produits issus intégralement de ressources agricoles, comme l'éthanol et l'huile, ne voient pas leur contribution à l'effet de serre augmentée (émissions de C issu de la biomasse). Pour les produits constitués partiellement de produits issus de la biomasse et de produits dérivés du pétrole (ETBE, EMHV) la combustion contribue partiellement à l'effet de serre (pour la part de produit dérivé du pétrole contenu dans le produit).

Impact sur l'effet de serre en g eq. CO2 par MJ de produit (avant combustion)



Analyse des résultats des scénarios prospectifs

La comparaison des résultats des scénarios prospectifs par rapport aux scénarios de référence montre un large potentiel d'amélioration du bilan énergétique de filières éthanol de blé et de betterave (améliorations du bilan de l'éthanol de blé de 43% et du bilan de l'éthanol de betterave de 31%).

Dans une moindre mesure, pour la filière colza et tournesol, un progrès de l'ordre de 5 à 10% est envisagé. Au contraire, si le procédé de catalyse hétérogène se développe, le bilan énergétique du produit EMHV sera allourdi de 8% environ.

L'amélioration attendue des performances énergétiques des filières blé et betterave par unité de surface est supérieure à 140% alors que pour les filières colza et tournesol, l'évolution prévisible se situe entre 7 et 11%. Ces différences s'expliquent principalement par l'importante amélioration du bilan énergétique des filières blé et betterave ainsi que par l'évolution des rendements pour les cultures de blé et betterave plus importante que pour les cultures de colza et tournesol.

De la même façon que pour le bilan énergétique, la comparaison des résultats des scénarios prospectifs par rapport aux scénarios de référence montre un large potentiel d'amélioration dans le cas des bilans de gaz à effet de serre pour l'ensemble des filières biocarburants. Ce progrès est de l'ordre de 40% pour les filières éthanol (blé et betterave) et de l'ordre de 20% pour les filières ETBE de blé et de betterave.

Dans une moindre mesure, une amélioration de l'ordre de 10% est prévisible pour les filières EMHV de colza et de tournesol. Au contraire, si le procédé de catalyse hétérogène se développe, le bilan gaz à effet de serre des produits EMHV de colza ou de tournesol sera légèrement allourdi (de 4 à 9%).

Enfin, le bilan gaz à effet de serre des filières huile pourrait s'améliorer de 6 à 9%.

Concernant les carburants classiques, alors que les bilans énergétiques et gaz à effet de serre de l'essence se voient très légèrement améliorés (environ 1 % pour le bilan de l'énergie non renouvelable mobilisée et 4% pour le bilan gaz à effet de serre), les résultats montrent une dégradation des bilans pour la filière gazole de l'ordre de 0,4% d'augmentation pour l'énergie non renouvelable mobilisée et d'environ 22% pour les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2009. L'amélioration du bilan de l'essence est liée à une diminution de la consommation énergétique de 8% pour l'étape de raffinage de l'essence en 2009. Ces variations sont directement liées aux hypothèses formulées (évolution de la demande, modification du commerce extérieur, structure d'approvisionnement constant, ...) et à la nature des investissements requis dans la modélisation. Par ailleurs l'amélioration du bilan énergétique (réductions de consommation, changement de combustibles...) des raffineries n'a pas été étudiée.

Annexe

Données de référence utilisées pour établir les bilans énergétiques et gaz à effet de serre

Carburants	PCi (MJ /kg)	Sources données	Contenu en C fossile (%)	Contenu en C biomasse (%)
Essence	42.5	Guibet/TFE	87.5%	0%
Gazole	42.8		85.0%	0%
Méthanol	19.9	Greet	37.5%	0%
Isobutène	44.7	TFE	86.0%	0%
MTBE	35.22	IFP	69.5%	0%
ETBE	35.88	DIREM/IFP	45.6%	24.5%
Ethanol	26.8		0%	52.2%
Huile de colza	37.2	Sofiproteol	0%	77.0%
Huile de tournesol	37.7		0%	77.0%
EMHV colza	37.39		3.6%	69.7%
EMHV Tournesol	37.02		3.6%	69.7%

Détail de l'énergie procédée consommée au cours de l'ensemble des étapes de transformation

Energie consommée/Energie restituée	procédé	Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol
Sc Référence		0.091	0.164	0.163	0.238	0.247
Sc Prospectif 1		0.095	0.151	0.155	0.211	0.223
Sc Prospectif 2					0.265	0.278
Evolution (prosp 1 - réf)		5%	-8%	-5%	-12%	-10%
Evolution (prosp 1 - réf)					11%	13%

Energie procédée consommée/Energie restituée	Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
Sc Référence	0,146	0,457	0,471	0,287	0,309	0,314
Sc Prospectif 1	0,138	0,331	0,295		0,265	0,252
Sc Prospectif 2						
Evolution (prosp 1 - réf)	-5%	-28%	-37%		-14%	-20%
Evolution (prosp 1 - réf)						

Productivité par unité de surface des cultures :

quantité de biocarburants produite par ha sans tenir compte des allocations massiques entre produits et co-produits

cultures	Rendement	Productivité en biocarburant
Blé	9 t/ha	2,55 t éthanol / ha
Colza	3,34 t/ha	1,37 t huile / ha
Tournesol	2,24 t/ha	1,06 t huile / ha
Betterave (situation actuelle) *	66,2 t/ha	3 t éthanol + 3,7 t sucre / ha

* betterave à 17,7% de teneur en sucre. Pour la culture de betterave, le tableau présente une valeur de productivité correspondant à la situation actuelle (co-production d'éthanol et de sucre). Si l'on considère une surface dédiée exclusivement à la production d'éthanol, la productivité à l'hectare serait de 5,78 t/ha (en prenant comme hypothèse que 1 tonne de betterave à 16% de sucre donne 1 hl d'éthanol : donnée ADEME)