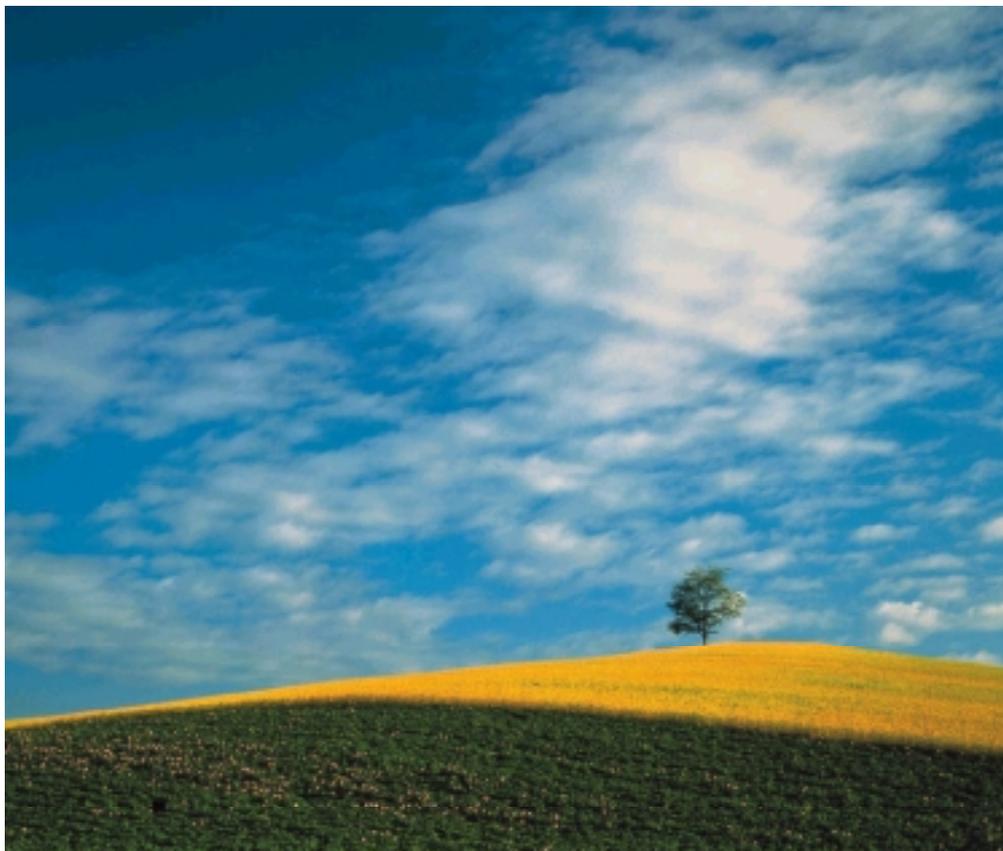


Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filères de production de biocarburants



Rapport technique

Version définitive
Novembre 2002

ADEME



Ecobilan

PRICEWATERHOUSECOOPERS 

DIREM



SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
SOMMAIRE DETAILLE	4
SECTION I	9
1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	9
2 LIMITATIONS	10
3 PRESENTATION DU COMITE DE PILOTAGE	12
4 DESCRIPTION DES PRODUITS ETUDIES	14
5 ORGANISATION DU PRESENT RAPPORT	15
SECTION II	16
6 FRONTIERES DES SYSTEMES ET UNITE FONCTIONNELLE	16
7 CHOIX METHODOLOGIQUES	19
8 NATURE DES FLUX ETUDIES	24
9 SOURCES DES DONNEES	26
SECTION III	36
10 FILIERES ESSENCE ET GAZOLE	36
11 FILIERE MTBE	40
12 FILIERE COLZA	41
13 FILIERE TOURNESOL	44
14 FILIERE BLE	47
15 FILIERE BETTERAVE	51
16 EXPLICATION DES BILANS ENERGETIQUES PAR HA DES DIFFERENTES CULTURES	56
17 PRODUCTIVITE PAR UNITE DE SURFACE DES DIFFERENTES CULTURES	59
SECTION IV	60
18 CARBURANTS CLASSIQUES	60
19 BIOCARBURANTS	66
20 SYNTHESE DES RESULTATS POUR LES CAS DE REFERENCE	84
SECTION V	87
21 TESTS DE PARAMETRES	87
22 DESCRIPTION DES SCENARIOS PROSPECTIFS RETENUS POUR LES SIMULATIONS	96
23 RESULTATS DES SIMULATIONS PROSPECTIVES DETAILLES PAR FILIERE	105
24 SYNTHESE DES RESULTATS POUR LA SIMULATION PROSPECTIVE	123
25 INTERPRETATION DES RESULTATS POUR LA SIMULATION PROSPECTIVE	127

SOMMAIRE DETAILLE

SECTION I – INTRODUCTION

1	CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	9
2	LIMITATIONS	10
2.1	LIMITATIONS QUANT AUX HYPOTHESES RETENUES	10
2.2	LIMITATIONS QUANT AUX DONNEES	12
3	PRESENTATION DU COMITE DE PILOTAGE	12
4	DESCRIPTION DES PRODUITS ETUDIES	14
5	ORGANISATION DU PRESENT RAPPORT	15

SECTION II – METHODOLOGIE DE REALISATION DES BILANS

6	FRONTIERES DES SYSTEMES ET UNITE FONCTIONNELLE	16
6.1	DEFINITIONS	16
6.2	BILAN SYNTHETIQUE DES ETAPES PRISES EN COMPTE DANS CHAQUE FILIERE	18
6.2.1	<i>Carburants classiques</i>	18
6.2.2	<i>Biocarburants</i>	18
7	CHOIX METHODOLOGIQUES	19
7.1	PROCEDURES D'ALLOCATION POUR LES CO-PRODUITS	19
7.2	PRISE EN COMPTE DE LA COGENERATION DANS CERTAINS CAS	22
7.3	CHOIX METHODOLOGIQUES SPECIFIQUES POUR LES BILANS DES BIOCARBURANTS	22
7.3.1	<i>Emissions de N₂O à l'échelle de la parcelle agricole</i>	22
7.3.2	<i>Stockage de Carbone biomasse</i>	24
8	NATURE DES FLUX ETUDIES	24
8.1	POUR LES BILANS ENERGETIQUES	24
8.2	POUR LE BILAN DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	25
9	SOURCES DES DONNEES	26
9.1	FILIERES CARBURANTS CLASSIQUES : ESSENCE ET GAZOLE	26
9.1.1	<i>Etape de production du pétrole brut</i>	26
9.1.2	<i>Etape de transport</i>	26
9.1.2.1	Transports du pétrole brut	26
9.1.2.2	Transports des carburants en France	27
9.1.3	<i>Etape de raffinage</i>	28
9.2	FILIERES BIOCARBURANTS	28
9.2.1	<i>Etape de culture</i>	28
9.2.1.1	Intrants agricoles	28
9.2.1.2	Itinéraires techniques	29
9.2.2	<i>Etape de transformation industrielle</i>	29
9.2.2.1	Etape de transformation industrielle des graines de colza et tournesol	29
9.2.2.2	Production d'huile et d'EMHV à partir de colza et tournesol	30
9.2.2.3	Etape de transformation industrielle des grains de blé en éthanol	30
9.2.2.4	Etape de transformation industrielle des racines de betterave en éthanol	31
9.2.2.5	Etape de transformation industrielle de l'éthanol de blé et betterave en ETBE	32
9.2.3	<i>Transports</i>	32
9.2.3.1	Transport en amont de l'étape de transformation industrielle	32

9.2.3.2	Transport de l'éthanol vers les raffineries	32
9.2.3.3	Transport du produit final jusqu'aux dépôts régionaux	33
9.3	AUTRES SOURCES DES DONNEES	33
9.3.1	<i>Matières premières</i>	33
9.3.1.1	Méthanol	33
9.3.1.2	Coupe isobutène	33
9.3.1.3	Autres matières premières	33
9.3.2	<i>Modèles de production d'énergie</i>	34
9.3.2.1	Production de l'électricité	34
9.3.2.2	Production et combustion de ressources énergétiques	34
9.3.3	<i>Consommation de gasoil liée aux transports</i>	34
9.3.3.1	Transport fluvial	34
9.3.3.2	Transport par rail	34
9.3.3.3	Transport par camion	35
9.4	EVALUATION DE LA QUALITE DES DONNEES ET DE LA REPRESENTATIVITE	35

SECTION III – DESCRIPTION DETAILLEE DE CHACUNE DES FILIERES ETUDIEES

10	FILIERES ESSENCE ET GAZOLE	36
10.1	SCHEMA DES FRONTIERES DU SYSTEME	36
10.2	DESCRIPTION DES ETAPES DE LA FILIERE	36
10.2.1	<i>Etape de production du pétrole brut</i>	36
10.2.2	<i>Etape de transport du pétrole brut</i>	37
10.2.2.1	Transport du pétrole brut	37
10.2.2.2	Transports des carburants en France	37
10.2.3	<i>Etape de raffinage</i>	38
11	FILIERE MTBE	40
11.1	SCHEMA DES FRONTIERES DU SYSTEME	40
12	FILIERE COLZA	41
12.1	SCHEMA DES FRONTIERES DU SYSTEME	41
12.2	DESCRIPTION DES ETAPES DE LA FILIERE	42
12.2.1.1	Itinéraire culturel	42
12.2.1.2	Transport des graines jusqu'au site de transformation	43
12.2.1.3	Transformation du colza en huile	43
12.2.1.4	Transformation de l'huile en EMHV	43
12.2.1.5	Distribution des produits jusqu'aux dépôts régionaux	43
13	FILIERE TOURNESOL	44
13.1	SCHEMA DES FRONTIERES DU SYSTEME	44
13.2	DESCRIPTION DES ETAPES DE LA FILIERE	45
13.2.1.1	Itinéraire culturel	45
13.2.1.2	Transport des graines jusqu'au site de transformation	45
13.2.1.3	Transformation du tournesol en huile	46
13.2.1.4	Transport de l'huile depuis les sites de trituration jusqu'au site de Boussens de synthèse d'EMHV de tournesol	46
13.2.1.5	Transformation de l'huile en EMHV	46
13.2.1.6	Distribution des produits jusqu'aux dépôts régionaux	46
14	FILIERE BLE	47
14.1	SCHEMA DES FRONTIERES DU SYSTEME	47
14.2	DESCRIPTION DES ETAPES DE LA FILIERE	48
14.2.1.1	Itinéraire culturel	48
14.2.1.2	Approvisionnement en blé	49
14.2.1.3	Transformation industrielle du blé en éthanol	49
14.2.1.4	Transport de l'éthanol vers la raffinerie	50
14.2.1.5	Etape de synthèse de l'ETBE	50
14.2.1.6	Etape de distribution de l'éthanol et l'ETBE jusqu'aux dépôts régionaux	50

15	FILIERE BETTERAVE	51
15.1	SCHEMA DES FRONTIERES DU SYSTEME	51
15.2	DESCRIPTION DES ETAPES DE LA FILIERE	53
15.2.1.1	Itinéraire cultural	53
15.2.1.2	Approvisionnement en betterave	54
15.2.1.3	Transformation industrielle des betteraves en éthanol	54
15.2.1.4	Transport de l'éthanol vers la raffinerie	55
15.2.1.5	Etape de synthèse de l'ETBE	55
15.2.1.6	Etape de distribution de l'éthanol et l'ETBE jusqu'aux dépôts régionaux	55
16	EXPLICATION DES BILANS ENERGETIQUES PAR HA DES DIFFERENTES CULTURES	56
16.1	CULTURE DE COLZA	56
16.2	CULTURE DE TOURNESOL	57
16.3	CULTURE DE BLE	57
16.4	CULTURE DE BETTERAVE	58
17	PRODUCTIVITE PAR UNITE DE SURFACE DES DIFFERENTES CULTURES	59
<u>SECTION IV – RESULTATS</u>		
18	CARBURANTS CLASSIQUES	60
18.1	ESSENCE	60
18.2	GAZOLE	62
18.3	MTBE	65
19	BIOCARBURANTS	66
19.1	BIOCARBURANTS : FILIERE COLZA	66
19.1.1	<i>Huile de colza</i>	66
19.1.2	<i>EMHV de colza</i>	68
19.2	FILIERE TOURNESOL	70
19.2.1	<i>Huile de tournesol</i>	70
19.2.2	<i>EMHV de tournesol</i>	72
19.3	FILIERE BLE	74
19.3.1	<i>Ethanol de blé</i>	74
19.3.2	<i>ETBE de blé</i>	76
19.4	FILIERE BETTERAVE	78
19.4.1	<i>Ethanol de betterave</i>	78
19.4.2	<i>ETBE de betterave</i>	81
20	SYNTHESE DES RESULTATS POUR LES CAS DE REFERENCE	84
20.1	BILANS ENERGETIQUES	84
20.2	BILANS GAZ A EFFET DE SERRE AVANT HYPOTHESE DE COMBUSTION	85
20.3	BILANS GAZ A EFFET DE SERRE AVEC HYPOTHESE DE COMBUSTION TOTALE	86
<u>SECTION VI – INTERPRETATION DU CYCLE DE VIE</u>		
21	TESTS DE PARAMETRES	87
21.1	PRISE EN COMPTE DE L'ENERGIE D'AMORTISSEMENT DES MATERIELS AGRICOLES	87
21.2	STOCKAGE DE CARBONE DANS LES SOLS	89
21.3	FACTEURS D'EMISSIONS POUR LE N ₂ O	92
22	DESCRIPTION DES SCENARIOS PROSPECTIFS RETENUS POUR LES SIMULATIONS	96
22.1	ESSENCE ET GAZOLE	96
22.2	FILIERES COLZA ET TOURNESOL	98

22.2.1	<i>Variante prospective de culture du colza et du tournesol</i>	98
22.2.2	<i>Evolutions attendues dans la phase industrielle de production des huiles et EMHV de colza et tournesol</i>	99
22.2.2.1	Procédé industriel d'estérification de type "Compiègne"	99
22.2.2.2	Procédé industriel d'estérification par "catalyse hétérogène (procédé IFP)"	99
22.2.3	<i>Transports dans le scénario prospectif</i>	99
22.3	FILIERE BLE	100
22.3.1	<i>Variante prospective de l'étape de culture du blé : évolution attendues à l'horizon 2009</i>	100
22.3.2	<i>Evolution de l'approvisionnement de la distillerie d'Origny compte tenu de l'augmentation sa capacité</i>	101
22.3.3	<i>Evolution technologique attendue pour l'étape de transformation industrielle</i>	101
22.3.4	<i>Récupération du CO₂ fermentaire émis à des fins commerciales.</i>	102
22.4	FILIERE BETTERAVE	103
22.4.1	<i>Variante prospective de l'étape de culture de betterave : évolutions attendues à l'horizon 2009</i>	103
22.4.2	<i>Evolutions technologiques attendues pour l'étape de transformation industrielle des betteraves en éthanol</i>	104
22.4.3	<i>Récupération du CO₂ fermentaire émis à des fins commerciales.</i>	104
23	RESULTATS DES SIMULATIONS PROSPECTIVES DETAILLES PAR FILIERE	105
23.1	ESSENCE 2009	105
23.2	GAZOLE 2009	105
23.3	FILIERE COLZA	106
23.3.1	<i>Huile de colza</i>	106
23.3.2	<i>EMHV de colza</i>	107
23.3.2.1	Simulation d'estérification de type "Compiègne"	107
23.3.2.2	Simulation d'estérification par "Catalyse hétérogène"	109
23.4	FILIERE TOURNESOL	111
23.4.1	<i>Huile de tournesol</i>	111
23.4.2	<i>EMHV de tournesol</i>	112
23.4.2.1	Simulation d'estérification de type "Compiègne"	112
23.4.2.2	Simulation d'estérification par "Catalyse hétérogène"	113
23.5	FILIERE BLE	115
23.5.1	<i>Ethanol de blé</i>	115
23.5.2	<i>ETBE de blé</i>	117
23.6	FILIERE BETTERAVE	119
23.6.1	<i>Ethanol de betterave</i>	119
23.6.2	<i>ETBE de betterave</i>	121
24	SYNTHESE DES RESULTATS POUR LA SIMULATION PROSPECTIVE	123
24.1	BILANS ENERGETIQUES : SCENARIOS ATTENDUS A L'HORIZON 2009	123
24.2	BILANS GAZ A EFFET DE SERRE AVANT COMBUSTION DES SCENARIOS ATTENDUS A L'HORIZON 2009	124
24.3	BILANS GAZ A EFFET DE SERRE DES SCENARIOS ATTENDUS A L'HORIZON 2009 AVEC HYPOTHESE DE COMBUSTION TOTALE	125
25	INTERPRETATION DES RESULTATS POUR LA SIMULATION PROSPECTIVE	127
25.1	BILANS ENERGETIQUES	127
25.2	BILANS GAZ A EFFET DE SERRE (AVANT COMBUSTION)	130
25.3	BILANS GAZ A EFFET DE SERRE AVEC HYPOTHESE DE COMBUSTION TOTALE	131

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Spécifications des carburants fossiles étudiés	14
Tableau 2 : PCI et contenu en carbone des différents produits	15
Tableau 3 : choix méthodologiques retenus pour la prise en compte des différents co-produits.....	21
Tableau 4 : Caractéristiques du transport du brut vers la France.....	37
Tableau 5 : Caractéristiques et consommations énergétiques de l'étape de distribution des carburants des raffineries vers les dépôts régionaux.	38
Tableau 6 : Bilans énergétiques et effet de serre de l'étape de raffinage (scénario 2005).....	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Frontières du système pour le bilan énergétique de produits agricoles	17
Figure 2 : Prise en compte des co-produits : extension des frontières du système	19
Figure 3: Prise en compte des co-produits par imputation massique des consommations et émissions du procédé	20

LISTE DES ANNEXES

Annexe I – Relevés de décisions des comités de pilotage

Annexe II – Données de références utilisées dans les bilans

Annexe III et IV - Détail des bilans pour les scénarios de référence pour les carburants fossiles et biocarburants

Annexe V et VI - Les résultats détaillés pour les tests de paramètres et les scénarios prospectifs des différentes filières.

SECTION I

Introduction

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

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

Le soutien et le développement de ces filières nécessitent une **connaissance quantitative fiable de leurs performances énergétiques et effet de serre**, qui constituent leurs deux points forts d'un point de vue environnemental et d'indépendance énergétique.

Dans ce contexte, la **Direction de l'Agriculture et des Bioénergies de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME)** d'une part, et la **Direction des Ressources Énergétiques et Minérales (DIREM)** du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie d'autre part se sont associés pour produire les bilans des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre, fiables, actualisés et représentatifs du **cas français** :

- des filières pétrolières classiques (essence et gazole) françaises ;
- des principaux biocarburants produits et utilisés en France : éthanol et ETBE de blé et de betterave, huile et EMHV de tournesol et de colza ;
- les bilans énergétiques et gaz à effet de serre du MTBE ont également été rajouté au cahier des charges initial de cette étude.

Plusieurs travaux d'analyse énergétique ou bien d'analyse de cycle de vie ont déjà été menés sur ces filières depuis plus de 10 ans et ont permis dans un premier temps de contribuer aux premières étapes bibliographiques de cette étude.

Les différentes études existantes, réalisées dans des contextes différents, ne portaient que sur l'une ou l'autre des filières de biocarburants, étaient fondées sur des données relatives à une certaine époque de développement des produits, avaient été conduites dans des objectifs différents, et sur la base de choix méthodologiques et d'hypothèses de travail également différents.

Dans un deuxième temps, il s'avérait donc important d'actualiser et de compléter les différentes données existantes, mais aussi d'assurer des choix méthodologiques comparables entre filières, et cela afin d'établir des bilans énergétiques homogènes.

La présente étude avait également pour objectif de proposer des bilans actualisés et adaptés au cas français, en suivant la même méthodologie d'évaluation, concernant les "carburants classiques", essence et gazole, toujours dans l'objectif de disposer d'éléments comparatifs fiables.

Les résultats de cette étude ont donc pour objectif de mettre à disposition de l'ensemble des parties prenantes des informations fiables et robustes, pouvant être intégrées dans leurs prises de décision.

Dans un premier temps, ces bilans ont été effectués dans le cas des scénarios de références représentatifs de la production française actuelle.

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

Ces bilans seront produits en appliquant la méthodologie normalisée des Analyses de Cycles de Vie (ACV)¹, limitée cependant au suivi de certains flux et indicateurs (dans le cadre des bilans énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre)

Ce travail a été confié à la société **Ecobilan, membre du Département Développement Durable du cabinet PricewaterhouseCoopers**, qui a également fait appel à l'Institut Français du Pétrol (IFP) dans le cadre des bilans concernant les carburants classiques.

La société Ecobilan dispose historiquement de la plus longue expertise en matière d'ACV en France, et a par ailleurs exercé de nombreuses études dans les secteurs de l'Agriculture et de l'Energie. L'IFP réunit également de nombreux experts dans le domaine des carburants fossiles, de leurs productions et des modélisations technico-économiques de l'industrie pétrolière française.

Cette étude s'est déroulée de janvier à juin 2002.

Le présent rapport, ainsi que ses annexes, constituent la source d'information la plus complète sur l'ensemble des hypothèses, des choix méthodologiques, et sources de données, qui ont été retenus pour aboutir aux résultats finaux ci-après présentés.

Une note de synthèse jointe à l'étude permet de résumer les principales conclusions et de rappeler les éléments méthodologiques indispensables à connaître pour une lecture avertie et objective des résultats.

2 LIMITATIONS

2.1 Limitations quant aux hypothèses retenues

La lecture des résultats de l'étude nécessite d'être averti sur les principaux choix qui ont été retenus pour permettre de procéder aux bilans énergétiques et gaz à effet de serre, afin d'éviter une mauvaise interprétation de ces résultats.

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, 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.

¹ Série de normes ISO 14040 à 43.

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 façon 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.

Indicateurs sur la mobilisation d'énergie non renouvelable :

L'objectif des présents bilans énergétiques est de pouvoir comparer les performances des produits par rapport à la vulnérabilité des ressources énergétiques :

- Les indicateurs utilisés portent sur l'énergie non renouvelable mobilisée.
- La mobilisation de cette énergie n'est pas forcément sa 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 consommée. Aussi, la combustion des produits ne modifierait pas les bilans que cette étude présente (sous réserve qu'aucune source énergétique supplémentaire ne soit nécessaire à la combustion).

En matière d'énergie renouvelable, il est à noter que l'énergie solaire, principale composante renouvelable dans le cadre de l'évaluation des biocarburants, est considérée comme une ressource inépuisable et ne fait donc pas l'objet d'un suivi dans les indicateurs de résultats.

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 contribuent également 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'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 l'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 de l'essai. 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 l'étude des filières biocarburants menée par l'ADEME et la DIREM est du point de vue du bilan gaz à effet de serre une étude à long terme, et qu'il est difficile de conclure aujourd'hui sur 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 pas été retenue dans le cas de l'étude des scénarios de référence.
- En revanche, s'il est démontré dans l'avenir que le stockage de carbone biomasse est durable à long terme, il constitue un levier important d'amélioration des bilans de gaz à effet de serre pour les biocarburants. L'impact qu'aurait sur le bilan des gaz à effet de serre de chacune des

filières, le stockage de 50 ou 200 kg de carbone par ha et par an sur les cultures de blé, colza ou tournesol a donc été prise en compte et étudié dans les simulations effectuées.

Les émissions 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 (nature des terrains...). Des travaux sont en cours de finalisation sur ce sujet au sein de l'INRA. Dans le cadre de cette étude, des facteurs d'émission ont été retenus (voir paragraphe 7.3.1). Il importe de savoir que l'échelle de variation de ces émissions peut être significative.

Utilisation de la méthodologie des ACV, limitée à certains flux :

cette étude a été effectuée en suivant la méthodologie des ACV. Cependant, contrairement à une ACV classique, multicritères (émissions dans l'eau, acidification atmosphérique, production de déchets...) seul le suivi de certains flux a été effectué, et ceci dans l'esprit du cahier des charges de l'étude : la réalisation de bilans énergétiques et gaz à effet de serre.

2.2 Limitations quant aux données

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.

3 PRESENTATION DU COMITE DE PILOTAGE

Conformément au souhait de l'ADEME et de la DIREM de voir joints au déroulement du projet une large représentation des différents intervenants de chacune des filières, un large comité de pilotage a été constitué, pour le suivi du projet.

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,
- de se valider les résultats obtenus.

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

Des institutionnels :

- Monsieur Roy et Monsieur Poitrat de l'ADEME, Direction de l'Agriculture et des Bioénergie,
- Monsieur Gaudillière et Monsieur Charles du Ministère de l'Industrie, l'Economie et des Finances, direction des ressources énergétiques et minières (DIREM),
- Monsieur Meuric et Madame Thienard du Ministère de l'Industrie, l'Economie et des Finances, Observatoire de l'Energie,
- Monsieur Gourdon du Ministère de l'Agriculture,

- Madame Guillaume du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement,
- Madame Nadia Boeglin, ADEME.

Des industriels :

- Monsieur Alard de Bio Ethanol Nord Picardie,
- Monsieur Crédoz du groupe Cristal Union, également Directeur de la Fédération des Coopératives de Betteraves,
- Monsieur Brinon de la Société SAIPOL,
- Monsieur Girard et Monsieur Lebreton de TotalFinaElf,
- Monsieur Costes et Madame Le Borgne de PSA.

Des centres techniques industriels et instituts techniques et de recherche :

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

Ce comité de pilotage s'est réuni à quatre reprises au cours du projet.

Une réunion de lancement a été organisée le 24 janvier 2002. Cette première réunion avait pour but de présenter à l'ensemble du comité de pilotage le contexte, les objectifs de l'étude et de présenter la méthodologie employée pour réaliser les bilans.

Une première réunion intermédiaire a eu lieu le 4 mars 2002 suite à la première phase du projet correspondant à un état des lieux des sources de données existantes, pouvant alimenter la réalisation de ces bilans. Cet état des lieux a fait l'objet d'une synthèse bibliographique dont l'objectif était :

- d'identifier les sources de données existantes et exploitables pour chacune des filières étudiées, et chacune des étapes au sein de chaque filière,
- de comparer, lorsqu'elles existent, les données issues de différentes sources disponibles pour une filière ou une étape au sein d'une filière,
- d'identifier les choix méthodologiques importants effectués dans chacune de ces études susceptibles d'influencer le calcul des bilans énergétiques et gaz à effet de serre pour les filières étudiées,
- de présenter des valeurs de référence (PCI de produits pétroliers, de biocarburants...) et des bilans d'étapes (exemple : la trituration des graines donne en masse x% d'huile et (1-x%) de tourteaux), sur lesquelles l'ensemble du comité de pilotage doit s'accorder,
- et enfin, d'identifier les besoins d'actualisation de données et de collecte de données pour certaines filières ou étapes de filières.

Cette réunion a abouti d'une part à une décision consensuelle du comité de pilotage sur les choix méthodologiques retenus et d'autre part à la validation par le comité de pilotage des besoins de collecte et de validation des données. En outre, elle a permis d'identifier les correspondants au

sein du comité de pilotage (sites de collectes pour les données industrielles, instituts techniques pour les données agricoles).

Une deuxième réunion intermédiaire, avait pour but de présenter les premiers résultats des bilans par filière pour les scénarios de référence, a été réalisée le 13 mai 2002. Elle a permis de recueillir des commentaires sur ces résultats et de revoir certains choix méthodologiques (en particulier les émissions de N₂O et la modélisation du stockage de carbone sur les parcelles). Cette réunion a permis de statuer sur les choix pour la réalisation de simulations sur les résultats.

Les fichiers de calcul ont été fournis par filière aux membres du comité de pilotage concernés pour vérification et validation du modèle de calcul. Cette étape a permis de revoir les calculs, les modélisations et d'apporter les modifications s'avérant nécessaires.

La réunion finale planifiée le 24 juin avait pour objectif de présenter les résultats des bilans énergétiques et gaz à effet de serre de chaque filière pour les scénarios de références ainsi que pour les variantes étudiées correspondant à des scénarios prospectifs.

L'ensemble des relevés de décision de ces différentes réunions est fourni en Annexe I.

4 DESCRIPTION DES PRODUITS ETUDIÉS

Quatre filières de production de biocarburants ont été étudiées : blé, betterave, colza et tournesol. Pour chacune des filières, deux produits ont été étudiés :

- pour les filières colza et tournesol : huile végétale et ester méthylique d'huile végétale (EMHV),
- pour les filières blé et betterave : éthanol (à 97% d'alcool) et ethyl tertio-butyl ether (ETBE).

Des scénarios prospectifs ont été étudiés pour chacune de ces filières et prennent en compte des évolutions technologiques probables à l'horizon 2009.

Trois carburants fossiles issus de filières de production classiques ont également fait l'objet de l'étude :

- gazole avec les spécifications 2005 (50 ppm de soufre),
- essence sans plomb 95 avec les spécifications 2005 (50 ppm de soufre),
- MTBE.

Des spécifications ultérieures (2009 à 10 ppm de soufre) pour le gazole et l'essence sont étudiés dans le cadre des tests de simulation sur les résultats.

Carburants	2000	2005	2009
Essence	150 ppm de soufre	50 ppm de soufre	10 ppm de soufre
	42% d'aromatiques	35% d'aromatiques	35% d'aromatiques
Gazole	350 ppm de soufre	50 ppm de soufre	10 ppm de soufre

Tableau 1 : Spécifications des carburants fossiles étudiés

Les caractéristiques de ces produits sont résumées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Essence	Gazole	Méthanol	Isobutène	MTBE
Pci (MJ/kg)	42.5	42.8	19.9	44.7	35.22
Source	Guibet TFE	Guibet TFE	Greet	TFE Bio Ethanol Nord Picardie	IFP
Contenu en C fossile (% massique)	87.5%	85.0%	37.5%	86.0%	69.5%
Contenu en C biomasse (% massique)	0%	0%	0%	0%	0%

Caractéristiques	ETBE	Ethanol	Huile de colza	Huile de tournesol	EMHV colza	EMHV Tournesol
Pci (MJ/kg)	35.88	26.8	37.2	37.7	37.39	37.02
Source	DIREM IFP	DIREM IFP	Sofiproteol	Sofiproteol	Sofiproteol	Sofiproteol
Contenu en C fossile (% massique)	45.6%	0%	0%	0%	3.6%	3.6%
Contenu en C biomasse (% massique)	24.5%	52.2%	77.0%	77.0%	69.7%	69.7%

Tableau 2 : PCI et contenu en carbone des différents produits

Certains PCI retenus peuvent être différents de ceux utilisés dans les statistiques de l'Observatoire de l'Energie qui envisage de les réviser prochainement conformément à la décision de son conseil d'orientation.

5 ORGANISATION DU PRESENT RAPPORT

La section II du présent rapport présente la méthodologie adoptée pour l'établissement des bilans énergétiques et gaz à effet de serre. Cette partie détaille les frontières du système, les choix méthodologiques retenus, les flux et indicateurs étudiés ainsi que les sources de données.

Une description détaillée des filières étudiées est présentée en section III.

Les résultats des scénarios de référence sont présentés et interprétés dans la section IV. Pour chaque filière étudiée, la contribution des différentes étapes de production est explicitée afin d'analyser les indicateurs énergétiques et gaz à effet de serre.

Enfin, la section V présente les résultats des simulations, notamment sur les variantes technologiques prospectives, déterminées par les membres du comité de pilotage. Les indicateurs énergétiques et gaz à effet de serre calculés à l'issue des bilans de ces scénarios prospectifs sont présentés en comparaison avec les indicateurs calculés dans le cas des scénarios de référence.

SECTION II

Méthodologie de réalisation des bilans

La réalisation de ces bilans de filières s'est appuyée sur la méthode des Analyses de Cycle de Vie (ACV), méthode normalisée (ISO 14040 à 43) et reconnue pour la réalisation de bilans environnementaux à l'échelle de produits ou services.

Ce choix permet de disposer d'une méthode transparente d'analyse, point important dans le cadre de la communication des résultats.

Dans le cadre de cette étude, la méthode ACV utilisée s'est limitée au suivi de certains flux énergétiques et émissions de gaz à effet de serre.

La réalisation de l'étude, en collaboration avec le comité de pilotage, a suivi les étapes classiques et normalisées de réalisation d'une ACV :

1. Définition des objectifs et des frontières du système ;
2. Collecte des données ;
3. Analyse ;
4. Interprétation et réalisation de simulations pour tester certains paramètres clefs (potentiel de variation de certains paramètres, évaluation des performances en fonction de développements attendus dans les prochaines années...).

6 FRONTIÈRES DES SYSTÈMES ET UNITÉ FONCTIONNELLE

6.1 Définitions

Les frontières du système sont définies depuis l'extraction des matières premières jusqu'au dépôt régional de distribution : l'unité fonctionnelle consiste à la mise à disposition au point de stockage d'une quantité de carburant.

La frontière avale du système est le dépôt avant distribution, que le produit soit ou non en mélange. Pour les produits en mélange, cette étude n'intègre pas le bilan énergétique de l'opération de réalisation du mélange, et donc le contenu énergétique du mélange. Seule l'énergie du produit faisant l'objet de l'étude est prise en compte.

Les différentes filières de carburants ont été traitées séparément sans prendre en compte les mélanges.

L'unité fonctionnelle utilisée correspond à l'unité énergétique : 1 MJ de produit faisant l'objet de l'étude : éthanol, ETBE, huile, EMHV, essence, gazole, MTBE.

Cependant, les résultats des bilans énergétiques sont présentés à la fois par unité énergétique de produit (MJ) et par unité massique (kg de produit). La présentation des résultats en unité volumique n'a pas été retenue en raison des variations de densité en fonction de la température.

Comme cela a déjà été indiqué au paragraphe 2 Limitations, l'étape d'utilisation des biocarburants (combustion) ne fait pas partie de l'étude ; cependant, de manière à aider les lecteurs dans l'interprétation des conclusions, certains résultats présenteront des bilans gaz à effet de serre avec combustion. Les émissions liées à la combustion ont été estimées en prenant l'hypothèse de combustion totale (en utilisant la teneur en carbone des produits étudiés).

Les frontières du système sont détaillées pour chacune des filières :

- paragraphe 10.1 pour les filières essence et gazole ;
- paragraphe 11.1 pour la filière MTBE ;
- paragraphe 12.1 pour la filière colza ;
- paragraphe 13.1 pour la filière tournesol ;
- paragraphe 14.1 pour la filière blé ;
- paragraphe 15.1 pour la filière betterave.

Enfin, notons qu'en ce qui concerne les frontières du système considéré pour le bilan énergétique des produits agricoles, comme cela est suggéré sur le schéma de la Figure 1, 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 sont non 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.

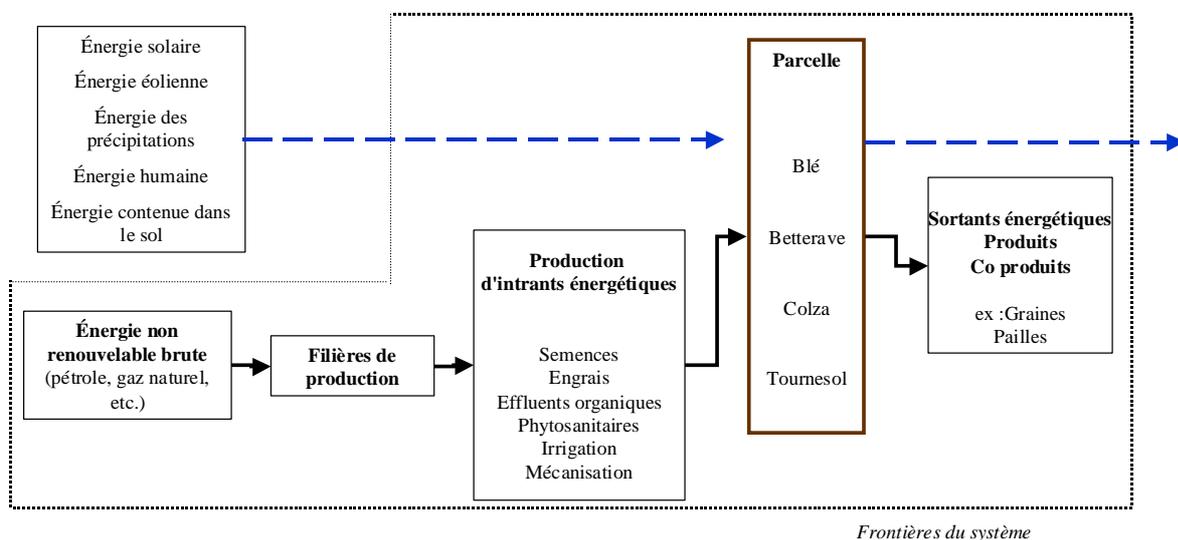


Figure 1 : Frontières du système pour le bilan énergétique de produits agricoles

6.2 Bilan synthétique des étapes prises en compte dans chaque filière

6.2.1 Carburants classiques

Les principales étapes de production prises en compte pour les carburants classiques essence et gazole et MTBE sont :

- production du pétrole brut ;
- transport du brut ;
- raffinage ;
- distribution depuis la raffinerie jusqu'au dépôt de distribution.

Pour la production de MTBE, les principales étapes sont :

- la production et le transport du méthanol jusqu'à la raffinerie ;
- la production de la coupe isobutène en raffinerie ;
- la synthèse du MTBE en raffinerie ;
- la distribution depuis la raffinerie jusqu'au dépôt de distribution.

6.2.2 Biocarburants

En ce qui concerne les filières de production des biocarburants, les étapes prises en compte sont les suivantes :

- **La culture** : la prise en compte de la synthèse des intrants agricoles (engrais N, P, K, produits phytosanitaires), de la mécanisation des itinéraires techniques (consommation de carburant des outils agricoles en tenant compte des différentes opérations culturales et des temps de passage de chaque opération) et dans certains cas des impacts évités en apport d'engrais N, P, K liés à l'enfouissement de certains résidus ;
- **L'approvisionnement des usines de production des biocarburants** : la prise en compte de la distance de transport entre les coopératives agricoles ou les exploitations et les usines de transformation industrielle ;
- **La transformation industrielle** : la prise en compte des consommations d'énergie, et des émissions de gaz à effet de serre sur le site, ainsi que de la synthèse des matières premières consommées dans le procédé de transformation. Les co-produits éventuellement liés à l'une ou l'autre des étapes du procédé industriel sont pris en compte en appliquant une règle d'allocation massique (voir paragraphe 7.1) ;
- **La synthèse des produits EMHV et ETBE** : la prise en compte de la production du méthanol et de l'isobutène ;
- **Le transport des produits** jusqu'au dépôt avant distribution.

7 CHOIX METHODOLOGIQUES

7.1 Procédures d'allocation pour les co-produits

Les filières étudiées ont la particularité de présenter de nombreux co-produits tout au long des étapes de production.

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

- **extension des frontières du système** : substitution des impacts évités des produits valorisés. Cette règle a été retenue dans l'étude pour les produits enfouis ou épandus sur parcelle agricole (schématisé dans la Figure 2 ci-dessous),
- **imputation ou allocation, de préférence basée sur une règle physico-chimique** : l'imputation massique a été retenue (voir Figure 3). Cette règle a été retenue aux différentes étapes industrielles, lorsque le procédé conduit à produire, outre le produit intéressant l'étude, un autre produit qui est également valorisé.

Solution a : extension des frontières du système

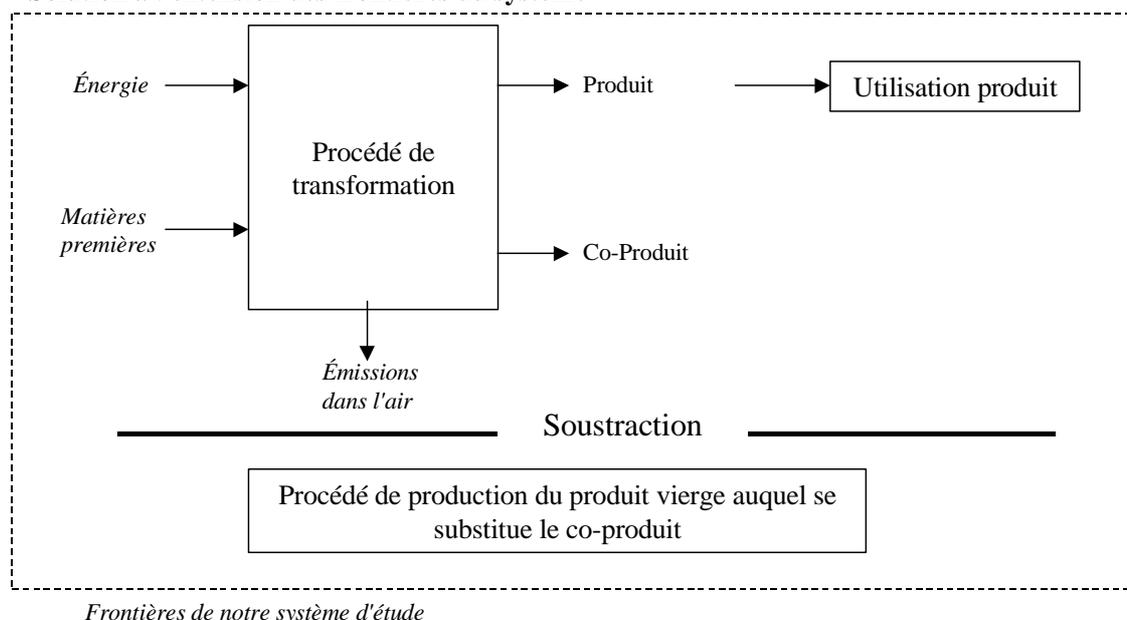


Figure 2 : Prise en compte des co-produits : extension des frontières du système

Solution b : imputation ou allocation de α des consommations et émissions

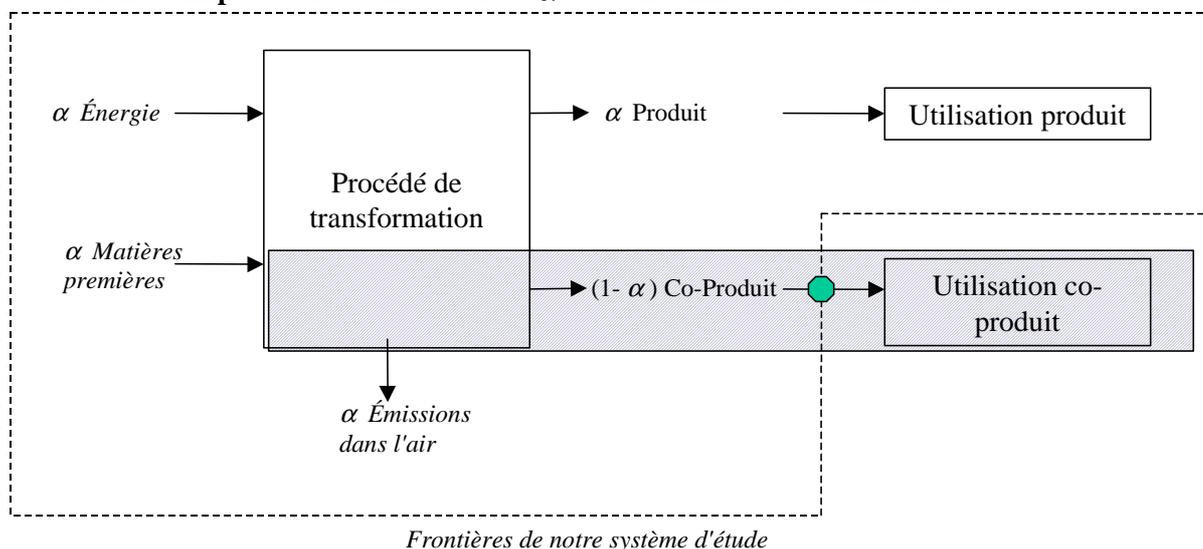


Figure 3: Prise en compte des co-produits par imputation massive des consommations et émissions du procédé

La prise en compte des co-produits en ACV peut suivre une troisième règle qui consiste à allouer l'intégralité des consommations et émissions du procédé au produit. Elle n'a pas été retenue dans le cadre de cette étude par le comité de pilotage.

Les co-produits identifiés pour chacune des filières ont été validés par le comité de pilotage. De plus, le choix de la méthode de prise en compte de ces co-produits dans le bilan des filières de production des produits étudiés a été validé pour chacun des co-produits par les représentants du comité de pilotage compétents sur les filières.

Le Tableau 3 présente pour chacun des co-produits des filières étudiées, son mode de valorisation et la règle méthodologique retenue pour prendre en compte ce co-produit dans les bilans effectués dans le cadre de l'étude.

Produits	Co-produits	Valorisation	Choix méthodologique		
			Extension des frontières	Allocation massique	% allocation ²
Betterave	Verts	Enfouis	✓		- 100% impacts synthèse engrais P et K, - 60% impacts synthèse engrais N
	Sucre	Valorisé : industrie		✓	-10% consommations énergétiques de l'étape de cristallisation imputées à l'égout - 31,5% de la masse de sirop utilisée dans l'étape de cristallisation imputée à l'égout
	Pulpes	Valorisées : alimentation animale		✓	80% imputé au jus de diffusion
	Boues de procédé	Valorisées : épandage agricole	✓		100% impacts synthèse engrais N, P K
	Ecumes	Valorisées : épandage agricole			
	Vinasses	Valorisées : épandage agricole			
Blé	Pailles	86% enfouies et 14% exportées	✓		96% impacts synthèse engrais P, K
				✓	96% de l'étape de culture imputé au blé
	Solubles concentrés	Valorisé : alimentation animale		✓	43% imputé aux flègmes
	Drèches (humides et sèches)	Valorisées : alimentation animale		✓	
Colza et tournesol	Pailles	Enfouies	✓		100% impacts synthèse engrais P, K
	Tourteaux	Valorisés : alimentation animale		✓	46% à l'huile pour le colza 49% à l'huile pour le tournesol
	Huiles acides au semi-raffinage	Valorisés : industrie cosmétique		✓	97% à l'huile
	Glycérine et huiles acides	Valorisées (industrie)		✓	88% à l'EMHV
Essence et gazole	Différents produits pétroliers	Valorisées dans l'industrie		✓	Imputation massique au sein de la raffinerie entre les différents co-produits

 % des impacts évités des produits valorisés substitués dans le cas où le choix méthodologique retenu est l'extension des frontières du système

 % d'allocation massique

Tableau 3 : choix méthodologiques retenus pour la prise en compte des différents co-produits

² Les pourcentages d'allocation présentés dans le tableau correspondent au pourcentage des consommations et des émissions affecté au produit intéressant l'étude.

7.2 Prise en compte de la cogénération dans certains cas

La mise en place de la cogénération conduit à des gains énergétiques substantiels. Or, comme pour les co-produits, il convient de s'intéresser à la répartition des consommations énergétiques de l'unité de cogénération entre sa production de vapeur et sa production d'électricité.

Dans certains cas, l'unité de cogénération fonctionne intégralement pour les besoins du site. Aussi, il n'est pas nécessaire d'effectuer une imputation des consommations de l'unité de cogénération, les consommations énergétiques du site correspondant sommes toutes, à des consommations en gaz de l'unité de cogénération (cas des unités de transformation d'éthanol de blé et betterave par exemple).

Dans d'autres cas, l'unité de cogénération produit une quantité d'énergie qui n'est pas consommée par le site. C'est le cas de l'unité de production d'EMHV du site de SAIPOL à Grand-Couronne, site pris en compte dans l'étude, qui utilise de la vapeur produite dans une unité de cogénération gérée par un prestataire externe (société Cogelyo), qui revend par ailleurs l'électricité produite. Il faut donc répartir les consommations de gaz de l'unité entre l'électricité produite et la vapeur utilisée par le site de transformation de colza et de tournesol.

Pour ce faire, les données annuelles de production de vapeur et d'électricité, ainsi que les consommations de gaz naturel ont été fournies par le prestataire du site de Grand Couronne. Les données de la consommation théorique de gaz naturel pour la production de ces mêmes quantités de vapeur et d'électricité dans des unités classiques ont été calculées. Puis, la différence entre ces consommations théoriques, et les consommations réelles de l'unité, correspondant au gain de la cogénération a été proratisée entre la production d'électricité et de vapeur.

Dans le cas du site de Grand Couronne, les calculs ont conduit à considérer que la cogénération permettait d'obtenir 1MJ de vapeur à l'aide de 0,83 MJ de gaz naturel.

7.3 Choix méthodologiques spécifiques pour les bilans des biocarburants

7.3.1 Emissions de N₂O à l'échelle de la parcelle agricole

Lors de l'étape de culture, des émissions de N₂O se produisent à l'échelle des parcelles agricoles : cette production de N₂O est essentiellement d'origine microbienne et peut provenir de plusieurs transformations du cycle de l'azote et principalement du processus de dénitrification dans le cas des climats tempérés. Cependant, les émissions de N₂O à l'échelle de la parcelle agricole varient fortement en fonction du milieu naturel (type de sol, climat), du type de culture et des pratiques culturales.

Le comité de pilotage a souligné l'importance de la prise en compte de ces émissions.

L'IPCC₃ (Intergovernmental Panel on Climate Change) propose une méthodologie d'évaluation des émissions de N₂O. Son manuel de référence⁴ a pour objectif d'aider les pays à quantifier leurs émissions liées à leurs productions et pratiques agricoles⁵. Dans ce document, plusieurs sources d'émissions de N₂O sont distinguées, et pour chacune un mode de calcul des émissions

³ IPCC, 1997 : Guidelines for national greenhouse gas inventories, OCDE, Paris

⁴ IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Reference Manual – Chapter 4 : Agriculture

⁵ Dans ce document, les pages de référence sont 4-88 à 4-92, avec l'équation 1 comme référence ainsi que les pages 4-97 à 4-103.

est proposé. En particulier dans le cadre de la présente étude, les sources d'émissions potentielles retenues correspondent à l'application d'engrais minéraux de synthèse sur les parcelles.

Globalement, les émissions de N₂O liées à l'épandage d'azote sont calculées à partir de la quantité d'azote appliquée sur les parcelles.

Le facteur d'émission d'azote sous forme N₂O est de :

$$1 \text{ kg N/ha} + (1,25 \pm 1) \% \text{ des apports d'azote.}$$

Cependant, ce facteur d'émissions est sujet à d'importantes variations en fonction des conditions du milieu.

L'expertise actuelle⁶ en France sur le sujet indique que ce type de quantification est globalement satisfaisant dans le cadre d'évaluations globales (à l'échelle de la France par exemple), mais insuffisant pour tenir compte des spécificités locales.

Le comité de pilotage a souhaité par ailleurs utiliser des sources de données issues de mesures plus récentes que celles utilisées par l'IPCC.

Des essais ont été réalisés sur colza en 1999, sur différents sols en France. Ils ont confirmé l'extrême variabilité des émissions, d'un sol à l'autre : de 0.2 à 2.5% de l'azote apporté est émis sous forme de N₂O dans les seuls 5 mois qui suivent l'apport d'azote. Ces mesures ne permettent pas d'évaluer très précisément les émissions annuelles sur la parcelle. De plus, dans le cadre de l'étude, il reste à les adapter aux cas du tournesol, de la betterave et du blé.

Le CETIOM a proposé une méthode de calcul permettant de tenir compte de l'effet de la couverture du sol, au delà des émissions proportionnelles à l'apport d'azote. Cependant, après nouvel avis d'expert, il apparaît hasardeux d'évaluer ainsi l'effet sol.

L'expertise a donc préconisé d'utiliser simultanément deux sources de données :

- celles proposées par SKIBA⁷ en 1996, correspondant à des données anglo saxonnes, et qui proposent des facteurs d'émissions spécifiques pour chacune des cultures étudiées. Le principal défaut de ces résultats est qu'il repose sur un nombre très limité d'essais. Ce sont ces facteurs qui ont été retenus dans le cas de référence de l'étude ;
- celles proposées par l'IPCC, qui, même en constituant une approche globale, constituent la meilleure source actuelle de données publiques, travaillant sur un nombre significatif d'essais. Ces facteurs d'émissions ont été étudiés dans le cadre des tests de paramètres de l'étude.

Le tableau ci-dessous présente les facteurs d'émissions de N, sous forme N₂O, proposées par SKIBA (1996), et retenus dans le cas de référence de l'étude :

Culture	% de l'apport d'N émis sous forme N ₂ O
Blé	0.50%
Betterave	1.60%
Colza	0.50%
Tournesol	0.80%

⁶ M Germon, INRA de Dijon

⁷ SKIBA U.M., McTAGGART IP., SMITH KA., HARGREAVES KJ, FOWLER D., 1996. Estimates of nitrous oxide emissions from soil in the UK Energy Convers. Manag., 37, 1303-1308.

7.3.2 Stockage de Carbone biomasse

L'établissement du bilan gaz à effet de serre de l'étape de culture a soulevé la question de la prise en compte du stockage de CO₂ dans les sols sous forme de puits de carbone, lié à l'enfouissement des résidus des cultures.

Des travaux importants menés par M. Arrouays de l'INRA d'Orléans sont en cours afin d'évaluer le stockage de carbone des cultures annuelles. Cependant, ces travaux, en cours de revue en interne, n'étaient pas disponibles lors de la présente étude.

Néanmoins, d'après les résultats d'une étude récente réalisée par l'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 l'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 également que ces augmentations sont acquises pour l'essentiel durant les 20 premières années de l'essai. 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 conduite du point de vue du bilan à long terme des gaz à effet de serre, et qu'il est difficile de conclure aujourd'hui sur 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 cadre de l'étude des scénarios de référence.

En revanche, s'il s'avérait que le stockage de carbone biomasse est durable à long terme, il constituerait un levier important d'amélioration des bilans de gaz à effet de serre pour les biocarburants. L'importance du sujet a donc conduit à réaliser des tests de sensibilité sur ce paramètre, au travers de simulations. Deux hypothèses sont alors retenues :

- stockage de 50 kg de carbone par ha et par an pour chacune des 4 cultures,
- stockage de 200 kg de carbone par ha et par an pour les cultures de blé, colza et tournesol.

8 NATURE DES FLUX ETUDIÉS

8.1 Pour les bilans énergétiques

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.

Energie primaire totale	= Energie non renouvelable + Energie renouvelable
	= Energie combustible + Energie contenue dans la matière

- **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.

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 sont non 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.

8.2 Pour le bilan des émissions de gaz à effet de serre

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

- **CO₂** ;
- **CO₂ biomasse** ;
- **CH₄ fossile** ;
- **CH₄ biomasse** ;
- **N₂O**.

Un indicateur correspondant à l'impact de ces émissions en terme de potentiel d'effet de serre à 100 ans a été calculé ; les coefficients retenus dans le calcul sont ceux fournis par l'IPCC ; il est important de souligner que conformément au cahier des charges de l'étude, le calcul de l'indicateur se limite aux 5 flux présentés ci-dessus.

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

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

CO₂ issu de la biomasse :

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 (coefficient 0)⁸. En effet, le Carbone ainsi émis avait été prélevé dans l'atmosphère par la plante lors de sa croissance.

Cette règle retenue dans la présente étude correspond aux pratiques couramment utilisées en matière de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre.

Néanmoins, les émissions de C biomasse sous forme de CO₂ au sein des filières de production des biocarburants font l'objet d'un suivi spécifique. Ces émissions sont comptabilisées en tant que CO₂ biomasse, flux ne contribuant pas au calcul de l'indicateur de gaz à effet de serre, contrairement au CO₂ fossile plus généralement rencontré.

CH₄ issu de la biomasse :

Le méthane issu de la biomasse contribue à l'effet de serre.

⁸ Ce choix de modélisation a été abordé au paragraphe 2.

En effet, la fixation de carbone par les plantes s'effectue sous forme de CO₂. Compte tenu de la différence de participation à l'indicateur d'effet de serre de ces deux substances (méthane 23 fois plus contributeur que le dioxyde de carbone), il serait faux de considérer que le carbone issu de la biomasse et émis sous forme de CH₄ ne contribue pas à l'effet de serre.

D'après l'IPCC, aucune distinction n'est faite entre le méthane provenant de la biomasse et celui provenant d'autres sources (fossiles) en terme de contribution à l'effet de serre. C'est pourquoi le méthane fossile et le méthane biomasse ont le même coefficient de contribution aux émissions de gaz à effet de serre. Cette information a été validée auprès de la MIES (Mission Interministérielle de l'Effet de Serre).

Les émissions de méthane issues de la biomasse sont donc également comptabilisées de façon individualisées dans l'étude, sous forme de CH₄ biomasse. En revanche, contrairement au CO₂ biomasse, ces émissions de CH₄ biomasse contribuent à l'effet de serre.

9 SOURCES DES DONNEES

9.1 Filières carburants classiques : essence et gazole

9.1.1 Etape de production du pétrole brut

Les données concernant les consommations d'énergie dues au torchage des gaz associés pendant l'extraction du brut sont issues de différentes sources : « BP statistical review 2001 », « Natural Gas in the World, 2000 Survey Cedigaz », «Pétrole 2000, éléments statistiques, CPDP».

Les consommations énergétiques nécessaires à l'extraction du pétrole brut (traitement du brut sur champ) ont été estimées à 2% de la demande en pétrole.

Les émissions de gaz à effet de serre liées à cette étape sont calculées à l'aide de coefficients d'émissions fournis par l'IEA (International Energy Agency) pour le CO₂ et issus du modèle Greet pour les émissions de CH₄ et N₂O.

9.1.2 Etape de transport

9.1.2.1 Transports du pétrole brut

Dans le cadre du transport du pétrole brut vers les raffineries françaises, quatre zones d'importations ont été considérées, d'après les statistiques BIP (n° 9545, 27 février 2002).

En ce qui concerne les distances de transport, elles ont été estimées sur la base des sources suivantes :

- **Etape 1 : des champs extracteurs aux ports pétroliers** : les différentes longueurs de pipelines ont été estimées à l'aide des cartes géographiques Pétroconsultant et de l'ouvrage «Pétrole 2000, éléments statistiques, CPDP». La distance finale a été calculée au prorata des quantités importées par pays producteurs de pétrole. La consommation en fioul nécessaire au transport de brut a été estimée égale à 0.016 kWh/ t.km (source : Emissions à effet de serre associées aux véhicules électriques et thermiques sur toute la chaîne énergétique, Ch. Armengol, B. Bensaid, Institut Français du Pétrole, 1994) ;
- **Etape 2 : transport du brut par pétroliers** : la distance moyenne entre les ports pétroliers français et ceux des pays exportateurs de pétrole a été estimée à l'aide des données fournies dans «Pétrole 2000, éléments statistiques, CPDP», rapportées au prorata des quantités de pétrole importées. La répartition du trafic a été établie à l'aide des estimations proposées dans l'ouvrage intitulé : «Maritime and Pipeline, Transportation of Oil and Gas, Problems

and Outlook A. Poirier, G. Zaccour, 1991». Cette répartition permet de relier les quantités mondiales de pétrole brut transportées aux catégories de pétroliers existantes. Les différentes catégories de pétroliers ont été regroupées en deux classes : celle des 100 000 T et celle des 300 000 T. Leurs consommations énergétiques ont été évaluées à l'aide des valeurs fournies par les sociétés "The Green Tankers", "Francship armement" et par la direction maritime de "Total Fina Elf" ;

- **Etape 3 : transport du brut russe** : le pétrole russe est acheminé par tanker qui s'approvisionnent soit dans la mer noire soit en mer baltique. Les distances couvertes en mer ont été estimées entre les principaux ports de la mer noire et Fos/Mer et entre Le Havre et les principaux ports de la mer baltique. Ces ports sont alimentées par des pipes dont les distances ont été extraites de «Pétrole 2000, éléments statistiques, CPDP». La consommation énergétique en fioul a été calculée à l'aide de l'ouvrage « Le transport des hydrocarbures liquides et gazeux par canalisation », de J. Vincent-Genod pour une pression intérieure souhaitée égale à 75 kg/cm² (pression couramment observée dans les pipelines) ;
- **Etape 4 : transport de brut en France (des ports pétroliers vers les raffineries)** : la distance moyenne entre les ports pétroliers français et les raffineries a été estimée à partir des kilométrages couverts par les différents réseaux de pipelines transportant du pétrole brut rapportées à leurs débits annuels de transport (source : Pétrole 2000, éléments statistiques, CPDP). La consommation énergétique en électricité a été fournie par le principal réseau français de transport de pétrole brut : la Société du pipeline Sud-européen.

Les émissions de gaz à effet des étapes 1 et 2 sont calculées à l'aide de facteurs d'émissions fournis par l'IEA (pour le CO₂) et issus du Greet (« stationary reciprocating engine » pour moteur diesel) pour les émissions de CH₄ et N₂O. Pour l'étape 3, les sources de données utilisées sont également l'IEA (fioul résiduel) pour le CO₂, GREET (« barge » pour fuel résiduel) pour le N₂O et ETH (Moteur diesel pour bateaux) pour le CH₄.

Il est important de préciser que les valeurs des émissions de N₂O et de méthane ne sont fournies qu'à titre indicatif, les incertitudes pour l'estimation de ces rejets étant particulièrement importantes. Il s'agit en effet d'évaluer l'ordre de grandeur de ces émissions afin de s'assurer de leur négligeabilité.

Les valeurs des PCI sont tirées de « Carburants et Moteurs » (Guibet) pour le fioul lourd, le gazole et l'essence. Celui du pétrole brut provient des données du «Pétrole 2000, éléments statistiques, CPDP».

9.1.2.2 Transports des carburants en France

D'après les statistiques des transports pétroliers de carburants et de fiouls, le comité professionnel du pétrole, 2000, deux principaux modes de transports entre les raffineries et les dépôts régionaux ont pris en compte :

- **Etape 1** : transport entre les raffineries et les dépôts régionaux : la distance moyenne parcourue par pipelines entre les raffineries et les dépôts a été estimée à l'aide des valeurs fournies dans le «Pétrole 2000, éléments statistiques, CPDP». Les valeurs de consommation ainsi que la répartition des énergies utilisées ont été définies à l'aide des informations fournies par la Société du pipeline Méditerranée-Rhône, la Société française Donges-Metz et par la société Trapil (réseau Le Havre-Paris) ;
- **Etape 2** : transport par wagons : les valeurs de cette étape ont été fournies par la Note d'information économique n°343, Les Transports par fer en France, comité professionnel du pétrole, 28 décembre 2000.

Les émissions de gaz à effet de serre liées à la distribution des essences et du gazole ont été calculées à partir des facteurs d'émissions fournis par l'IEA et le GREET.

9.1.3 Etape de raffinage

Les données de l'étape de raffinage sont le résultat d'une modélisation réalisée à l'aide du modèle linéaire de raffinage IFP. La programmation linéaire est une technique d'optimisation qui permet de maximiser une fonction mathématique linéaire (appelée fonction objectif) sous des contraintes linéaires. Cette méthode permet de maximiser la marge d'une raffinerie en optimisant son fonctionnement sous différentes contraintes (capacités, spécifications, demande, ...). La méthode utilisée permet de prendre en compte les effets sur les émissions de CO₂ des raffineries du renforcement des spécifications mais également les effets liés à l'évolution de la demande.

Les principaux paramètres du modèle sont :

- l'approvisionnement français en pétrole brut en 2000, données IFP d'après DIREM ;
- les spécifications des carburants en 2000, 2005 et 2009, données IFP d'après l'IEA et Platt's ;
- la demande, les importations et les prix des produits pétroliers en 2000, données IFP d'après Platt's ;
- les prix import – export des pétroles bruts en 2000, données IFP d'après Platt's ;
- le nombre et la capacité des unités de traitement en 2000, données IFP ;
- les emplois – ressources du raffinage français en 2000, données IFP d'après l'IEA ;

Les hypothèses retenues pour le paramétrage du modèle sont présentées en Annexe II.

Les bilans énergétiques et effet de serre des filières de référence essence et gazole pour le secteur du raffinage français aux horizons 2005 et 2009 sont ainsi établis à partir des solutions optimales obtenues par programmation linéaire sur la base d'un modèle paramétré à partir de données de l'année 2000.

9.2 Filières biocarburants

9.2.1 Etape de culture

9.2.1.1 Intrants agricoles

La principale source utilisée pour la modélisation de l'étape de synthèse des intrants agricoles (engrais N, P et K et matières actives des produits phytosanitaires) est le « *Référentiel pour le calcul des bilans énergétiques – Productions agricoles* », menée en partenariat par l'ADEME, l'AGPB, l'AGPM, le CETIOM, la CGB, le groupe PLANETE, l'INRA, l'ITB, l'ITCF, le Ministère de l'Agriculture, le Ministère de l'Industrie, l'ONIDOL et SOFTDEAL, entre 1997 et 1999.

Cette étude fournit notamment le contenu énergétique des **intrants agricoles** englobant l'énergie nécessaire à l'élaboration et à la distribution de l'intrant (prise en compte de l'extraction des matières premières, de la phase de fabrication des engrais et de la phase de transport jusqu'à la ferme).

L'objectif du référentiel énergétique n'étant pas le calcul des émissions de gaz à effet de serre, celui-ci ne contient pas le détail nécessaire à ce calcul (notamment, les bilans énergétiques étant exprimés en énergie primaire, le type d'énergie utilisé n'est pas précisé). La principale source primaire du référentiel, à savoir *Gaillard, G. et al., 1997 : Inventaire environnemental des intrants agricoles en production végétale, base de données pour l'établissement de bilans énergétiques et écologiques en agriculture*, utilisée pour établir les bilans énergétiques a été utilisée dans le cas de la présente étude pour calculer les émissions de CO₂, CH₄ et N₂O des intrants agricoles.

9.2.1.2 Itinéraires techniques

Les informations relatives aux itinéraires techniques ont été fournies par les professionnels des instituts techniques : le CETIOM pour les cultures de colza et tournesol, l'ITCF pour le blé et l'ITB pour l'itinéraire technique de la culture de betterave.

Colza :

L'évaluation de l'itinéraire technique « moyen » pour le colza correspond à la moyenne des deux itinéraires définis pour les régions "Nord et Est", et "Ouest et Centre" à partir des enquêtes Charte Environnement Colza réalisées de 1993 à 2001 par le CETIOM. Cet itinéraire est représentatif des techniques culturales pratiquées sur la plus grande part de la surface française cultivée en colza, la surface de culture dans la région Sud étant négligeable.

Tournesol :

L'itinéraire technique moyen pour la conduite culturale du tournesol a été réalisé à partir d'une enquête conduite en 2001 par le CETIOM laquelle a été confrontée aux enquêtes des années précédentes. Ce dernier a été construit à partir de 5 itinéraires recouvrant l'ensemble des cultures de tournesol en France : Rhône-Alpes, Ouest, Sud-est, Sud-ouest et Centre, en tenant compte de la répartition des surfaces cultivées en tournesol en France (statistiques SCEES- Moyenne 1999-2001).

Blé :

L'évaluation de l'itinéraire technique « moyen » pour la culture de blé a été réalisé à partir de trois itinéraires techniques retenus, correspondant à trois départements (Eure et Loire, Marne et Somme) des trois principales régions productrices : la Beauce, la Champagne et la Picardie. La prise en compte de ces trois itinéraires techniques s'est faite au prorata des surfaces cultivées en blé dans ces trois régions. Les données sont issues d'une part d'enquêtes réalisées par l'ONIC (Office National Interprofessionnel des Céréales) sur les pratiques culturales, d'autre part correspondent à une expertise des ingénieurs régionaux de l'ITCF et de résultats sur un réseau de fermes suivies par le service économique de l'ITCF.

Betterave :

L'itinéraire technique retenu pour la culture de betterave correspond aux pratiques moyennes nationales : il a été établi à partir d'une enquête annuelle, interne à l'ITB (« SITE ») basée sur un système de réponse volontaire. Les réponses des exploitations sont ensuite réajustées afin d'être représentatives de la situation des exploitations françaises. En outre, les résultats obtenus en matière de consommation d'intrants agricoles sont comparés avec les résultats des panels réalisés par les firmes productrices d'engrais et de phytosanitaires, afin de vérifier leur compatibilité. Ainsi l'itinéraire retenu pour la culture de betterave est représentatif des pratiques moyennes nationales en 2001.

9.2.2 Etape de transformation industrielle

Les données correspondant à l'étape de transformation industrielle ont été collectées sur différents sites de production choisis par les professionnels des filières participant au groupe de travail. Ces sites ont été sélectionnés en fonction de la représentativité par rapport aux secteurs de production français.

9.2.2.1 Etape de transformation industrielle des graines de colza et tournesol

Les données de transformation des graines de colza en huile et EMHV ont été collectées en mars 2002, sur le site de SAIPOL, à Grand Couronne.

La première transformation des graines de colza ou tournesol consiste en une trituration des graines qui conduit à la production d'huile et de tourteaux. Cette trituration est suivie d'une étape de semi-raffinage qui produit l'huile neutre.

Représentativité du site étudié par rapport aux pratiques nationales :

Le site de SAIPOL à Grand Couronne produit à la fois de l'huile et l'EMHV, de façon intégrée sur le même site.

Il existe de très nombreuses unités de production d'huile en France, et le procédé de trituration et de semi-raffinage du site est classique.

Il existe 4 unités en France de production d'EMHV :

- **Site de Compiègne**, qui produit du EMHV depuis 1993, est un site intégré de production d'huile et d'EMHV à partir de graines ; l'agrément du site est de 60 500 t d'EMHV ;
- **Site de Grand Couronne (Rouen)**, qui produit du EMHV depuis 1995, et est un site intégré de production d'huile et d'EMHV à partir de graines ; l'agrément du site est de 180 500 t d'EMHV ;
- **Site de Boussens (Toulouse)**, qui produit du EMHV depuis 20 ans (l'installation actuelle existe depuis 10 ans), à partir d'huile semi-raffinée, provenant de la région ; l'agrément du site est de 33 000 t d'EMHV ;
- **Site de Verdun**, qui produit l'EMHV à partir d'huile semi-raffinée provenant en partie d'Allemagne. L'agrément du site est de 30 000 t d'EMHV.

Le site de Grand Couronne s'avère particulièrement représentatif par son volume de production en comparaison avec les autres sites de production d'EMHV.

D'un point de vue technologique, les sites de Grand Couronne et de Compiègne diffèrent, en particulier pour la phase d'estérification : à Compiègne, l'ester est purifié par lavage, tandis qu'à Rouen, il est purifié par distillation. La différence de procédé conduit vraisemblablement à davantage de consommations énergétiques sur le site de Grand Couronne, du fait du procédé lui-même de purification par distillation qui permet de mieux purifier la glycérine.

Les analyses de sensibilité sur des variantes technologiques d'estérification porteront à la fois sur :

- l'étude de l'estérification de type "Compiègne" ;
- l'étude du procédé de transestérification en cours de développement avec l'IFP.

9.2.2.2 Production d'huile et d'EMHV à partir de colza et tournesol

Les techniques de production de l'huile et de l'EMHV de tournesol sont voisines de celles du colza.

La principale différence, en dehors des rendements spécifiques pour chacune des filières, est liée à l'étape nécessaire de Wintérisation (afin d'ôter les cires présentes dans l'huile de tournesol).

Le site de SAIPOL produisait jusque récemment à la fois des huiles de tournesol et de colza. Il ne produit désormais plus que de l'huile et de l'EMHV de colza.

Les données relatives à la Wintérisation ont été fournies par M. Matthys sur le site de Grand Couronne.

9.2.2.3 Etape de transformation industrielle des grains de blé en éthanol

Les données de transformation des grains de blé en éthanol ont été collectées en mars 2002, sur le site de BENP (Bio - Ethanol Nord Picardie) à Origny Sainte Benoîte auprès de M. Georges

Alard, Directeur Général BENP et M. Philippe Roux, Directeur Industriel, Alcools et Sucres Spéciaux, Union SDA.

Représentativité du site étudié par rapport aux pratiques nationales :

Il existe deux unités de production d'éthanol à partir de blé en France, toutes deux affiliées à l'Union SDA : BENP à Origny – Sainte Benoîte et BCE (Brie Champagne Ethanol) à Provins.

L'éthanol produit par la société BENP sur le site d'Origny Sainte Benoite est vendu à deux raffineries du groupe Total Fina Elf : la raffinerie de Feyzin dans le Rhône et la raffinerie de Dunkerque dans le Nord-Pas-de-Calais.

Actuellement, la production de l'usine BENP est de 270 000 à 280 000 hectolitres d'éthanol par an dont 170 000 produits à partir de blé et le reste à partir de betteraves. L'alcool brut de betteraves est acheté directement à l'Union SDA et BENP n'en assure que la déshydratation.

D'un point de vue technologique, le site d'Origny se distingue par trois étapes spécifiques du procédé de fabrication de l'éthanol, dont certaines sont brevetées :

- **le travail à partir de blé entier** (fibres et gluten inclus) : ce procédé est intéressant car il permet d'obtenir un co-produit riche en protéines végétales et donc fortement valorisable en alimentation animale. Cette technique n'est cependant pas utilisée dans l'unité de production d'éthanol de blé de BCE, elle présente en effet l'inconvénient de nécessiter des capacités de volume importantes. L'alternative utilisée à BCE consiste à extraire le son en amont du procédé de fabrication ce qui permet de réduire fortement les volumes de matière première au sein du procédé ;
- **la fermentation continue** qui permet un gain de temps considérable ;
- **la récupération des vinasses claires** (déchet produit lors de la distillation) par réintégration dans le procédé de fabrication qui permet d'éviter leur concentration et donc une importante économie d'énergie.

9.2.2.4 Etape de transformation industrielle des racines de betterave en éthanol

Les données de transformation des betteraves en éthanol ont été collectées en mars 2002, sur le site de Cristal Union à Arcis sur Aube auprès de M. Régis Boulay, responsable production alcool du site d'Arcis et M. Christian Chevalier, responsable de la sucrerie d'Arcis. L'étape de collecte des données a été préparée lors d'une réunion au siège de la FCB – UCB avec M. Paul Crédoz, Directeur Général de la FCB-UCB, et directeur technique du groupe Cristal Union et M. Jean-Christophe Toury, Directeur des services techniques de la FCB qui nous a également accompagné lors de la visite du site d'Arcis sur Aube.

Représentativité du site étudié par rapport aux pratiques nationales :

On compte 16 sites de production d'éthanol à partir de betterave sucrière en France. La production de sucre à partir de betteraves présente la particularité de ne fonctionner qu'une partie de l'année (période de campagne betteravière : de septembre à décembre). En conséquence, la production d'éthanol à partir de betterave présente deux modes de fonctionnement différents au cours de l'année (période de campagne betteravière et intercampagne). Certaines distilleries dont la capacité est réduite ne fonctionnent en revanche qu'en période de campagne.

L'établissement d'Arcis-sur-Aube produit environ 650 000 hl d'alcools par an dont 320 000 hl d'alcool brut permettant la synthèse de 180 000 hl d'éthanol deshydraté. La ligne de production d'alcool brut et d'éthanol a été récemment installée sur le site d'Arcis-sur-Aube. Elle a en effet été déménagée en octobre 2001 du site de Bray-sur-Seine vers le site d'Arcis-sur-Aube. Cette ligne de production est représentative des technologies modernes disponibles pour la production

d'éthanol à partir de betteraves sucrières. La totalité de l'éthanol produit par le site d'Arcis-sur-Aube est vendue à la raffinerie de Feyzin du groupe TotalFinaElf.

C'est principalement sur l'économie d'énergie que portent les efforts du site d'Arcis sur Aube actuellement. En effet, l'unité de production consomme aujourd'hui deux fois moins d'énergie qu'en 1994, date du dernier écobilan de l'ETBE produit à partir d'éthanol de betterave. Un certain nombre de changements ont été réalisés depuis cette date et permettent d'expliquer la réduction de la consommation d'énergie :

- **une cristallisation à deux jets** permettant la suppression de l'étape de production de mélasse et une économie d'énergie pour l'étape de cristallisation du sucre. En contrepartie, on obtient un produit intermédiaire entre le sirop et la mélasse : l'égout (EP2) destiné à la distillerie ;
- **des colonnes à distiller fonctionnant à double effet** (colonnes installées en parallèle et couplées) permettant une économie d'énergie significative.

De plus, l'achat réalisé en 2001 d'une nouvelle ligne d'évaporation de vinasses avec compresseur de vapeur conduit également à d'importantes économies d'énergies. Cette nouvelle évaporation de vinasses installée en 2001 sur le site ne fonctionnait pas encore lors de notre visite. Nous avons néanmoins considéré les consommations énergétiques de ce procédé pour cette étape, en se basant sur les évaluations du fournisseur, puisque ce procédé est largement répandu dans d'autres distilleries donc représentatif de la situation moyenne des distilleries françaises.

9.2.2.5 Etape de transformation industrielle de l'éthanol de blé et betterave en ETBE

Les consommations énergétiques de l'étape de synthèse de l'ETBE sont des données de l'unité du site Nord ETBE collectées en 2001 et fournies par TotalFinaElf.

9.2.3 Transports

9.2.3.1 Transport en amont de l'étape de transformation industrielle

Les distances et modes de transport pour l'approvisionnement des usines de transformation industrielle en graines de colza, de tournesol, en blé et en betterave nous ont été fournies par les sites industriels à savoir :

- Site de Grand Couronne (transformation du colza) ;
- M. Nicol de Sofiproteol, pour la description des différents transports sur la filière tournesol, en particulier depuis les huileries jusqu'au site de Boussens pour la production d'EMHV de tournesol ;
- Site d'Origny (transformation du blé) ;
- Site d'Arcis (transformation de la betterave).

Les distances considérées correspondent aux distances d'approvisionnement moyennes spécifiques aux différents sites. Ces données sont comparables aux distances moyennes d'approvisionnement nationales des différents usines de transformation françaises.

9.2.3.2 Transport de l'éthanol vers les raffineries

Les distances et mode de transport pour la distribution de l'éthanol vers les unités de synthèse de l'ETBE en raffinerie nous ont été fournies par les sites industriels.

9.2.3.3 Transport du produit final jusqu'aux dépôts régionaux

Le transport du produit depuis le site jusqu'au dépôt de distribution s'effectue :

- soit directement (pour une petite partie des EMHV) ;
- soit via la raffinerie (éthanol de blé ou betterave, ETBE, une majeure partie des EMHV).

Dans le premier cas, les distances et modes de transport ont été communiqués par le site de Grand Couronne.

Dans les autres cas, les distances et le mode de transport depuis le site industriel de production jusqu'à la raffinerie a été communiqué par les sites industriels. Le transport depuis la raffinerie jusqu'au dépôt de distribution a été modélisé à l'identique de ce qui a été décrit pour la distribution de l'essence et du gazole, depuis la raffinerie jusqu'au dépôt (voir paragraphe 9.1.2).

Signalons que pour les huiles (colza ou tournesol), l'absence de débouché actuel à grande échelle n'a pas permis de prendre en compte un transport ultime, au delà du site de production.

9.3 Autres sources des données

9.3.1 Matières premières

9.3.1.1 Méthanol

Les données de production du méthanol sont issues :

- pour l'extraction du gaz naturel, des données de ETH, Zürich, 1996;
- pour la synthèse de méthanol par reformage du gaz naturel, des données du modèle Greet, "Transportation fuel model" d'Avril 2001 développé par l'Argonne National Laboratory (modèle Greet, version 1-5 a).
- pour le transport, des données transmises par l'IFP.

9.3.1.2 Coupe isobutène

Les données de synthèse de la coupe isobutène, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et N_2O) associées à cette synthèse ont été transmises par TFE, en avril 2002.

Le bilan s'établit comme suit :

- 5.1 MJ d'énergie primaire sont consommés pour la synthèse de la coupe (incluant la consommation énergétique sur le site, et les consommations en amont) ;
- Cette synthèse s'accompagne de 0.5 kg d'émissions de CO_2 par kg de coupe isobutène, agrégés sur l'ensemble de la filière de production de la coupe ;
- Les émissions de CH_4 et de N_2O représentent respectivement 1 pour cent et 1 pour mille de la contribution en équivalent CO_2 à l'indicateur effet de serre du produit.

9.3.1.3 Autres matières premières

Concernant l'ensemble des autres consommables utilisés sur les sites de production (acide phosphorique, soude, hexane...), différentes sources issues de la bibliographie sont utilisées. En particulier, citons :

- Les Ecoprofiles de l'APME (Association of Plastic Manufacturers in Europe), produits en grande partie par Boustead : utilisés pour modéliser les consommations de soude par exemple ;

- Les données issues du "Laboratorium für Energiesysteme ETH⁹ de Zurich, 1996 : utilisées pour modéliser la production d'acide phosphorique par exemple ;
- les données issues du Swiss Federal Office of Environment, Forests and Landscape (FOEFL or BUWAL), utilisées par exemple pour modéliser la production de coke, de pierre à chaux ou d'acide sulfurique par exemple.

9.3.2 Modèles de production d'énergie

9.3.2.1 Production de l'électricité

Pour toutes les consommations d'électricité prises en compte dans l'étude, le modèle retenu correspond au modèle moyen de production et de transport d'électricité en France en 1998. Cette électricité est produite à partir de :

- Charbon : 5.26% ;
- Fuel : 0.44% ;
- Gaz Naturel : 2% ;
- Nucléaire : 75% ;
- Hydraulique : 15.30% ;
- Gaz industriels: 2% (gaz de cokerie et gaz de hauts fourneaux).

Les pertes moyennes lors du transport de l'électricité (7.3%) ont été prises en compte.

Ces données de sources de production et de pertes lors du transport sont issues d'EDF ("Electricité de France", Environnement, Rapport d'activité 1999).

Les modèles de production d'électricité pour les différentes filières de production sont issus d'ETH¹⁰.

9.3.2.2 Production et combustion de ressources énergétiques

Les données de production et de combustion en chaudière de gaz naturel, de fuel lourd ou de charbon sont issues d'ETH.

Nous avons néanmoins, quand cela était possible, systématiquement retenu les données collectées lors de la visite de chacun des sites.

9.3.3 Consommation de gasoil liée aux transports

9.3.3.1 Transport fluvial

La modélisation des consommations et émissions associées au transport fluvial est issue de ETH, Zürich, 1996, page 63-64.

9.3.3.2 Transport par rail

Le transport par rail est supposé s'effectuer à 20% au diesel, et à 80% à l'électricité (moyenne européenne). Les données de modélisation sont issues de ETH, Zürich, 1996, page 31.

⁹ Eidgenössische Technische Hochschule

¹⁰ Laboratorium für Energiesysteme ETH, Zurich, 1996

9.3.3.3 Transport par camion

Pour les différentes étapes de distribution en camion, le modèle d'évaluation des consommations tient compte :

- de l'efficacité du transport : 2/3 de la consommation du camion est indépendant de la masse transportée, tandis qu'un tiers est fonction de cette masse ;
- du fait que le camion effectue ou non un retour à vide (ajout de 2/3 supplémentaires).

La consommation d'un camion de 24 tonnes est ainsi calculée :

$$\text{Conso (litres/100 km)}/100 * \text{Distance parcourue(km)} * (2/3 + 1/3 * \text{masse du chargement(kg) / 24 000})$$

La consommation de référence d'un camion est retenue à 38 l /100 km.

Le modèle de production du diesel et de combustion dans les camions est issu de ETH, Zürich, 1996, page 22.

9.4 Evaluation de la qualité des données et de la représentativité

Cette étude correspond au bilan énergétique et gaz à effet de serre de la production et de la mise à disposition au dépôt de carburant de différents produits combustibles, en suivant la méthodologie des Analyses de Cycle de Vie, limitée à certains flux.

Conformément à la norme ISO 14040, les exigences relatives à la qualité des données couvrent notamment les critères suivants :

- **Représentativité temporelle** : les données utilisées sont représentatives de la situation actuelle (pour les biocarburants : itinéraires techniques agricoles 2001, collecte de données auprès des industriels pour l'année de production 2001 ; pour les carburants classiques, utilisation du modèle de raffinage de l'IFP, calé sur les paramètres de production des raffineries en 2000, et utilisé pour des carburants aux caractéristiques 2005, année du scénario de référence étudié) ;
- **Représentativité géographique** : les données collectées et utilisées dans l'étude sont représentatives de la situation française ;
- **Représentativité technologique** : les cas de référence dans l'étude correspondent à une technologie représentative de la production française des différents biocarburants ou encore à la moyenne française de la situation de production des carburants classiques, essence et gazole. Les simulations analysent les effets de technologies de production qui pourraient se développer dans les prochaines années ;
- **Précision des données** : les données utilisées doivent être suffisamment précises pour assurer que le niveau d'incertitude n'est pas supérieur aux écarts entre les résultats des simulations et des scénarios de référence ;
- **Cohérence** : les différents systèmes étudiés (cas de référence et simulations) sont traités de façon homogène ; il s'agit des principaux objectifs de la présente étude ;
- **Reproductibilité** : les résultats de l'étude doivent être reproductibles par une tierce partie ; C'est pourquoi, un ensemble maximal de données est fourni en annexe du rapport, en particulier concernant l'ensemble des données amont (intrants agricoles, ressources énergétiques et matières premières) utilisées aux différentes étapes de chacune des filières.

Par ailleurs, l'âge des données, le fait qu'elles aient été pour la plupart collectées en 2001-2002 pour les besoins de l'étude, et la recherche systématique de la description de situations caractéristiques de la situation française pour chacune des filières, permettent de considérer que la qualité des données utilisées dans ces bilans est de très bon niveau.

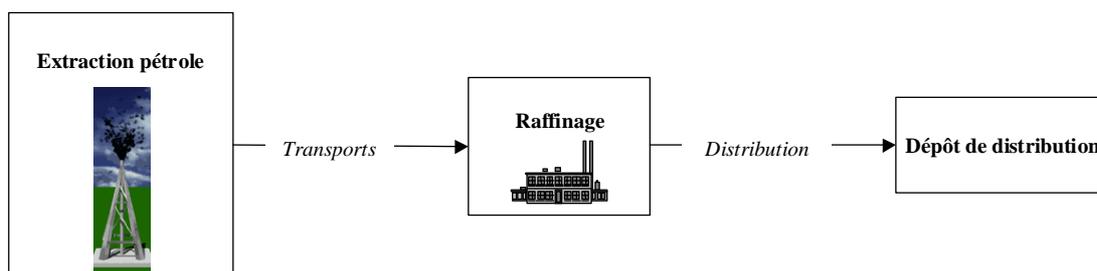
SECTION III

Description détaillée de chacune des filières étudiées

10 FILIERES ESSENCE ET GAZOLE

Les filières essence et gazole ont été étudiées par l'IFP. Le détail du travail de l'IFP et notamment des hypothèses retenues est présenté en Annexe II.

10.1 Schéma des frontières du système



10.2 Description des étapes de la filière

10.2.1 Etape de production du pétrole brut

Les consommations d'énergies et les émissions de CO₂ pour la production de pétrole brut ont deux origines principales :

- le torchage des gaz associés ;
- la consommations d'énergie nécessaire à la production du pétrole brut.

En moyenne, le torchage brûle 0.02412 MJ de gaz naturel/ MJ de brut produit.

Les consommations énergétiques nécessaires à l'extraction du pétrole brut (traitement du brut sur champ) ont été estimées à 2% de la demande en pétrole.

Le détail des consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre calculés pour cette étape est présenté en Annexe II.

10.2.2 Etape de transport du pétrole brut

10.2.2.1 Transport du pétrole brut

Pour le transport du pétrole brut vers les raffineries françaises, quatre zones d'importations ont été considérées.

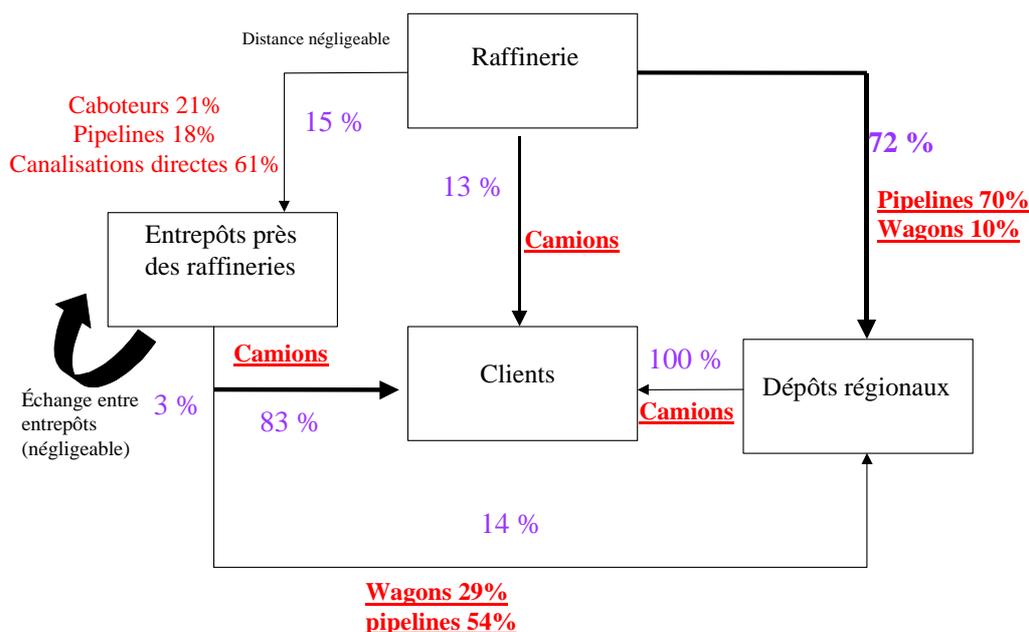
Les caractéristiques du transport sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Etapes considérées	Longueur du trajet	Consommation énergétique	Nature de la source d'énergie utilisée
Etape 1 : Champs extracteurs – Ports pétroliers (Proche-Orient, Afrique, Mer du nord)	350 km	0.016 kWh/t.km	Fioul
Etape 2 Transport du brut par pétroliers 100 000 T (50.7% du trafic) Transport du brut par pétroliers 300 000 T (49.3% du trafic)	6400 km	9.00*10 ⁻⁰³ t de fioul / t de brut	Fioul
	6400 km	7.50*10 ⁻⁰³ t de fioul / t de brut	Fioul
Etape 3 : Transport du brut russe (pipe+tanker de 100 000 T)	4500 km	5.00*10 ⁻⁰³ t. de fioul/t. de brut	Fioul
Etape 4 : Transport de brut en France (port pétrolier – raffinerie)	250 km	4.24*10 ⁻⁰³ kWh/t.km	Electricité EDF

Tableau 4 : Caractéristiques du transport du brut vers la France

10.2.2.2 Transports des carburants en France

Le transport des carburants en France suit le schéma suivant :



Les caractéristiques du transport sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Mode de transport	Part des carburants transportés	Distance moyenne parcourue	Consommation énergétique moyenne	Source de l'énergie fournie
Etape 1 Pipelines	70%	155 km	2.1*10 ⁻⁰³ kWh/t.km	99.1% Electricité EDF
			4.7*10 ⁻⁰³ kWh/t.km	0.9 % Diesel
Etape 2 wagons	11.5%	800 km	45% traction électrique : 14.3 kWh/km	Electricité EDF
			55% traction diesel : 250 l/100km	Gazole

Tableau 5 : Caractéristiques et consommations énergétiques de l'étape de distribution des carburants des raffineries vers les dépôts régionaux.

10.2.3 Etape de raffinage

La modélisation du raffinage de l'essence et du gazole consiste à étudier la production d'essence et de gazole à l'échéance 2005, en tenant compte :

- de la teneur en soufre des produits, à 50 ppm, pour l'essence comme pour le gazole ;
- des niveaux de production et d'incorporation d'ETBE et d'EMHV respectivement à l'essence et au gazole à l'échéance 2005 ;
- des scénarios de demande en 2005 ;
- du niveau des importations nettes.

Le calage du modèle de raffinage français a été réalisé sur l'année 2000. Il convient de noter que ce calage est tout à fait satisfaisant, du point de vu des entrées/sorties des unités, leurs taux de marche, et que les résultats obtenus pour 2005 et puis 2009 semblent tout à fait réalisables.

Les principaux investissements requis par les raffineries françaises portent essentiellement sur les unités de production de distillats moyens et de production et de purification d'hydrogène :

- capacités supplémentaires de 2,5 millions de tonnes dans l'hydrocraquage moyenne pression ;
- capacités supplémentaires de 2 millions de tonnes dans l'hydrocraquage ;
- 53 million of standard cubic feet per day (MMscfd) supplémentaires d'hydrogène dans le vaporeformage ;
- et 29 MMscfd supplémentaires dans la purification d'hydrogène (ex reformage catalytique).

Il convient de noter que les investissements requis pour les deux premiers types d'unités ont été limités, ce qui a nécessairement conduit, sans modification de la demande, à augmenter les importations de distillats moyens de 2 Mt.

En outre, il est supposé que 5 Mt de capacité d'hydrotraitement basse pression (ayant un taux d'hydrodésulfuration d'environ 90%) de distillats moyens a été revampée (en unité moyenne

pression et/ou en modifiant le catalyseur utilisé) pour atteindre des performances en hydrodésulfuration de l'ordre de 97-98%.

Ces différentes modifications semblent compatibles avec la structure du schéma de raffinage français actuel (13 sites industriels). Il convient néanmoins de garder à l'esprit que certains éléments ont été fixés par rapport à l'année 2000, notamment les prix et la structure d'approvisionnement, ou estimés, (consommation, commerce extérieur), et que leur modification peut avoir un impact direct sur le niveau et le type des investissements déterminés par l'optimisation.

En ce qui concerne le commerce extérieur, rappelons que les importations de distillats moyens (hors jet fuel dont les importations demeurent inchangées par rapport aux prévisions) ont été portées de 9 Mt à 14 Mt conformément aux résultats du calage du modèle (+3 Mt) et à la limitation des investissements (+2 Mt). Les exportations d'essences ont été augmentées d'1 Mt (soit 4 Mt au total) par rapport à celles envisagées initialement. Cette augmentation est reconduite pour 2009. Enfin, les exportations de fuels lourds sont plus faibles que prévu (2 Mt au lieu de 4 Mt).

Les émissions totales de CO₂ du raffinage français s'élèvent à l'optimum à 15,9 Mt en 2005, soit une hausse de 1,9 Mt par rapport à 2000 à iso-efficacité énergétique (c'est-à-dire en l'absence de toute amélioration technique et/ou opérationnelle dans la gestion énergétique de la raffinerie par rapport à la situation actuelle). Cette évolution est essentiellement due à la hausse de traitement en distillation atmosphérique d'une part et aux investissements dans les unités augmentant la production de distillats moyens (qui nécessitent une production supplémentaire importante d'hydrogène) d'autre part.

A partir des résultats obtenus à l'optimum, les bilans énergétiques et effet de serre des deux carburants étudiés peuvent être établis selon la méthode décrite précédemment.

Carburants	MJ / tonne	g.CO ₂ / MJ	MJ / MJ *	g.CH ₄ / MJ	g.N ₂ O / MJ
Gazole	42700	3,18	0,035	0,00004	0,00003
Essence	42600	6,98	0,087	0,00004	0,00003

* consommation énergétique par MJ de carburant

Tableau 6 : Bilans énergétiques et effet de serre de l'étape de raffinage (scénario 2005)

Les émissions de CO₂ par MJ de carburant produit apparaissent donc plus faibles pour le gazole que pour l'essence.

Comparativement, les émissions de CH₄ et de N₂O sont marginales quel que soit le carburant considéré.

En ce qui concerne le CO₂, les chiffres précédents correspondent à 0,14 tonnes de CO₂ émis par tonne de gazole produit et à 0,30 tonnes de CO₂ émis par tonne d'essence produite.

Enfin, nous suggérons pour le contenu en CO₂ du gazole importé de considérer en première approximation les mêmes valeurs que celles obtenues dans le cadre du raffinage français et mentionnées dans le Tableau 6.

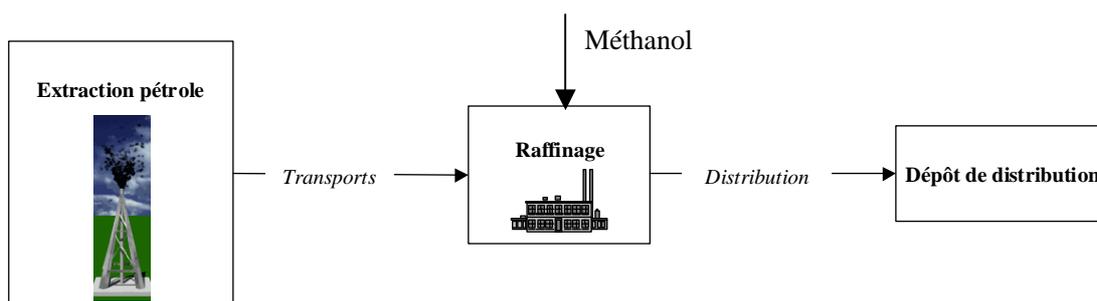
Le détail de la modélisation du raffinage est fourni en Annexe II.

11 FILIERE MTBE

Cette filière a été étudiée par l'IFP.

11.1 Schéma des frontières du système

Le schéma de fabrication du MTBE considéré dans cette étude correspond au procédé qu'utilisait la raffinerie de Feysin. Il est à noter que d'autres procédés existent en France (procédé utilisé par Lyondell à Fos sur Mer par exemple).



Les matières premières nécessaires à la production du MTBE (Méthyl tertio butyl éther) sont l'isobutène et le méthanol.

Issue du raffinage du pétrole, la filière isobutène est identique à celle décrite dans le paragraphe 9.3.1.

De même, la filière de production du méthanol a été décrite dans le paragraphe 9.3.1.

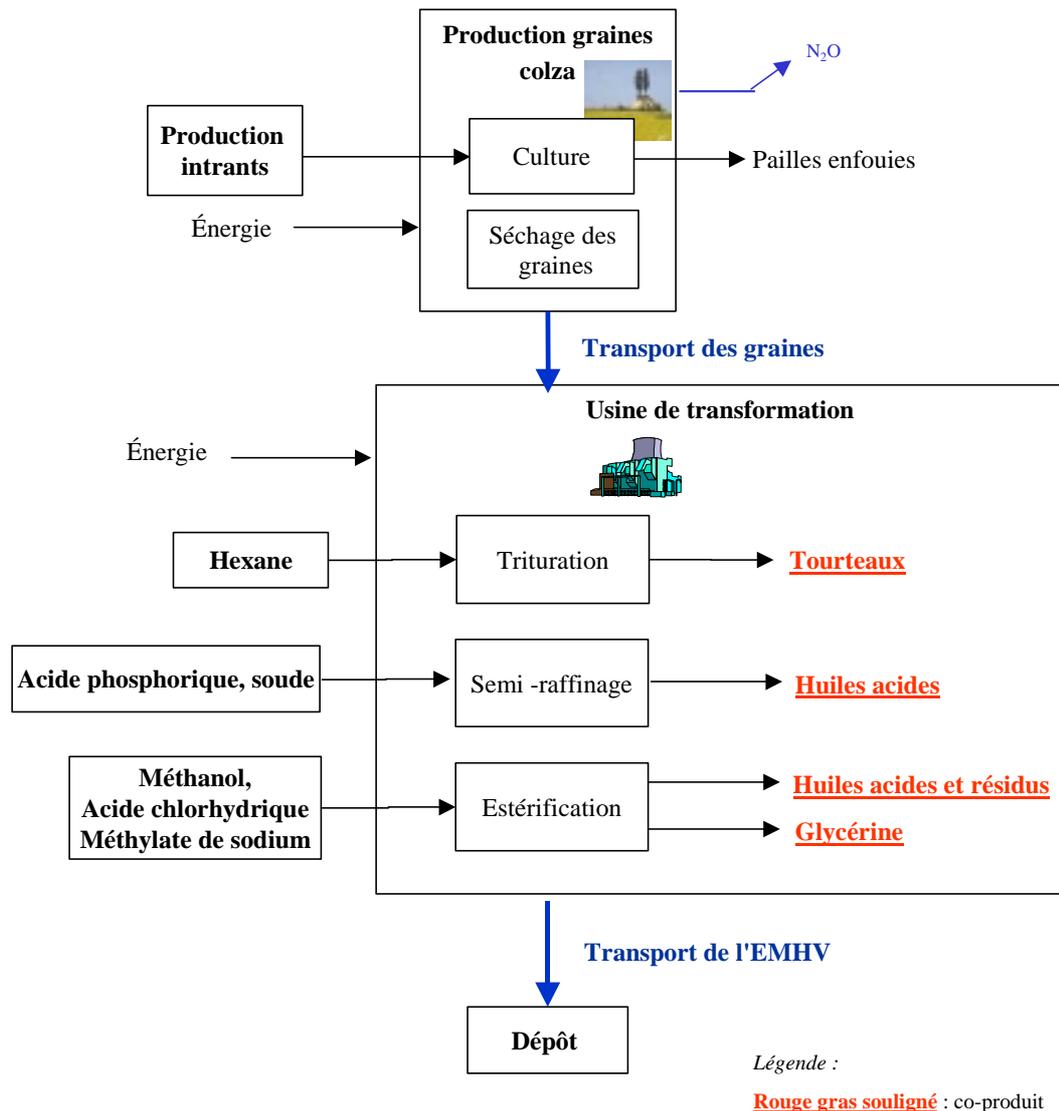
Pour l'opération de synthèse du MTBE, les valeurs de base retenues sont les suivantes :

- pour 1 kg de MTBE il faut 0.66 kg d'isobutène et 0.34 kg de méthanol ;
- ce procédé nécessite 0.066 MJ/MJ de MTBE produit ;
- les émissions de CO₂ associées au procédé sont de 119 g de CO₂ par kg de MTBE ;
- les émissions de méthane et de protoxyde d'azote sont, en première approximation, estimées équivalentes à celle des carburants pétroliers, soit 0.0014 g/kg de MTBE pour le méthane et 0.0011 g/kg de MTBE pour le protoxyde d'azote.

12 FILIERE COLZA

La filière colza a été étudiée par Ecobilan en collaboration avec le CETIOM, l'ITERG et la société SAIPOL. Toutes les données utilisées pour le calcul des bilans énergétiques et gaz à effet de serre ont été fournies et validées par le CETIOM pour la partie amont agricole et par la société SAIPOL pour les étapes de transformation industrielles.

12.1 Schéma des frontières du système



12.2 Description des étapes de la filière

12.2.1.1 *Itinéraire cultural*

Le rendement par hectare obtenu sur le colza est de 33,4 q/ha. Ce rendement a été évalué à partir d'une courbe de tendance construite sur les rendements réels de 1950 à 2001.

Les principales étapes de l'itinéraire moyen sont les suivantes :

- déchaumage de la culture précédente ;
- épandage des engrais de fond ¹¹. On note très peu de disparités régionales sur les quantités d'apports d'engrais ; ces apports constituent une fumure de fond apportée le plus souvent en tête de rotation. Afin d'attribuer ces quantités d'engrais aux différentes cultures, la même démarche a été appliquée pour chaque culture à savoir de comptabiliser les teneurs en P et K des produits (paille et graine). Dans le cas du colza, la teneur en P₂O₅ dans les graines est de 1,3% et celle des pailles est de 0,5%. De même la teneur en K₂O dans les graines est de 1% et celle des pailles s'élève à 2,1%.
- labour : 65 % des surfaces sont labourées (moyenne sur les surfaces cultivées en Colza en France) ;
- façons superficielles ;
- semis : la densité moyenne de semis est de 3 kg de graines/ha ;
- protection phytosanitaire : les apports de produits phytosanitaires moyen sont de 3,7 kg de matière active par hectare avec la répartition suivante : 77% d'herbicides, 8% de fongicides et 15% d'insecticides ;
- apport d'engrais : les quantités d'engrais sont, par hectare, de 170 kg d'azote (azote apporté soit sous forme ammonitrate, soit solution azotée), de 75 unités de Soufre (principalement sulfate d'ammonium). On note très peu de disparités régionales sur les quantités d'apports d'engrais ;
- récolte ;
- broyage.

Le temps de passage des machines agricoles est en moyenne de 7,8 heures totales pour un hectare toutes étapes confondues. Le nombre moyen de passages est de 17 passages.

Notons que la culture du colza n'est quasiment jamais irriguée.

La totalité des pailles est enfouie. Les teneurs en pourcentage de matière sèche de ces pailles en azote, phosphore et potassium sont de : 1,2% N, 0,51% P₂O₅ et 2,1% K₂O. L'enfouissement des pailles permet d'enrichir le sol en azote, phosphore et potassium. Le potassium et le phosphore sont réutilisés par la culture suivante : il a donc été considéré que l'enfouissement des pailles permet une économie d'engrais phospho-potassiques sous forme minérale pour la culture suivante. Pour l'azote, la minéralisation des résidus de récolte du colza a été prise en compte de façon simplifiée pour réduire la fertilisation azotée sur la culture suivante. En effet, lorsque la culture suivante est une culture de blé, les pratiques actuelles favorisent les repousses de colza afin de piéger l'azote issus des résidus de colza enfouis : le bénéfice a été réparti entre la culture de colza et la culture de blé.

Compte tenu des hypothèses présentées ci dessus, il a donc été considéré que 43 kg P₂O₅ et 33,4 kg K₂O apportés par hectare lors de l'apport de fumure de fond sont imputables à la culture de colza (43 kg P₂O₅ = 3340 kg / ha * 1,3% P₂O₅ et 33,4 kg K₂O = 3340 kg / ha * 1%).

¹¹ Dans le bilan effectué pour chaque filière, seule la part d'engrais de fond réellement utilisée par les parties exportées de la culture sont prises en compte (prise en compte des impacts évités liés à l'enfouissement des pailles de colza)

12.2.1.2 *Transport des graines jusqu'au site de transformation*

Les graines sont transportées en vrac en camion, en moyenne sur 150 km.

Le transport s'effectue sans retour à vide.

12.2.1.3 *Transformation du colza en huile*

Cette transformation dite de trituration est très classique, et s'effectue avec sensiblement les mêmes caractéristiques et rendements, d'un site à l'autre de trituration de graines en huile de colza.

La trituration conduit à produire de l'huile à partir des graines. Les tourteaux constituent le co-produit de cette étape. Cette étape s'accompagne d'une consommation d'hexane, afin d'extraire l'huile au maximum des graines de colza.

L'imputation massique (au pro rata de la matière sèche), conduit à imputer 46% des consommations et émissions de l'étape à l'huile brute produite.

L'étape de trituration est suivie d'une étape de semi-raffinage, qui produit l'huile neutre, ainsi qu'une petite part d'huiles acides valorisées dans l'industrie. Les consommations de cette étape sont imputées à 97% à la production d'huile neutre.

12.2.1.4 *Transformation de l'huile en EMHV*

La production de l'EMHV correspond à une réaction d'estérification entre l'huile et le méthanol.

Cette réaction s'effectue dans les proportions suivantes¹²:

1 kg d'huile + 0.1 kg de méthanol -> 1 kg d'EMHV + 0,1 kg de glycérol

Cette réaction s'accompagne de la production de glycérol et d'huiles acides, produits valorisés dans l'industrie. Cela conduit à imputer 88% des consommations de l'étape à l'EMHV.

12.2.1.5 *Distribution des produits jusqu'aux dépôts régionaux*

Cette distribution s'effectue :

- dans moins de 3% des cas directement depuis le site de production jusqu'au dépôt régional ;
- en grande majorité (97%) dans le reste des cas, la distribution s'effectue en deux étapes, en passant par la raffinerie.

Le transport depuis le site de production jusqu'à la raffinerie s'effectue :

- à 7% par route sur près de 400 km ;
- à 28% en train, sur environ 400 km ;
- à 65% par péniche sur environ 60 km .

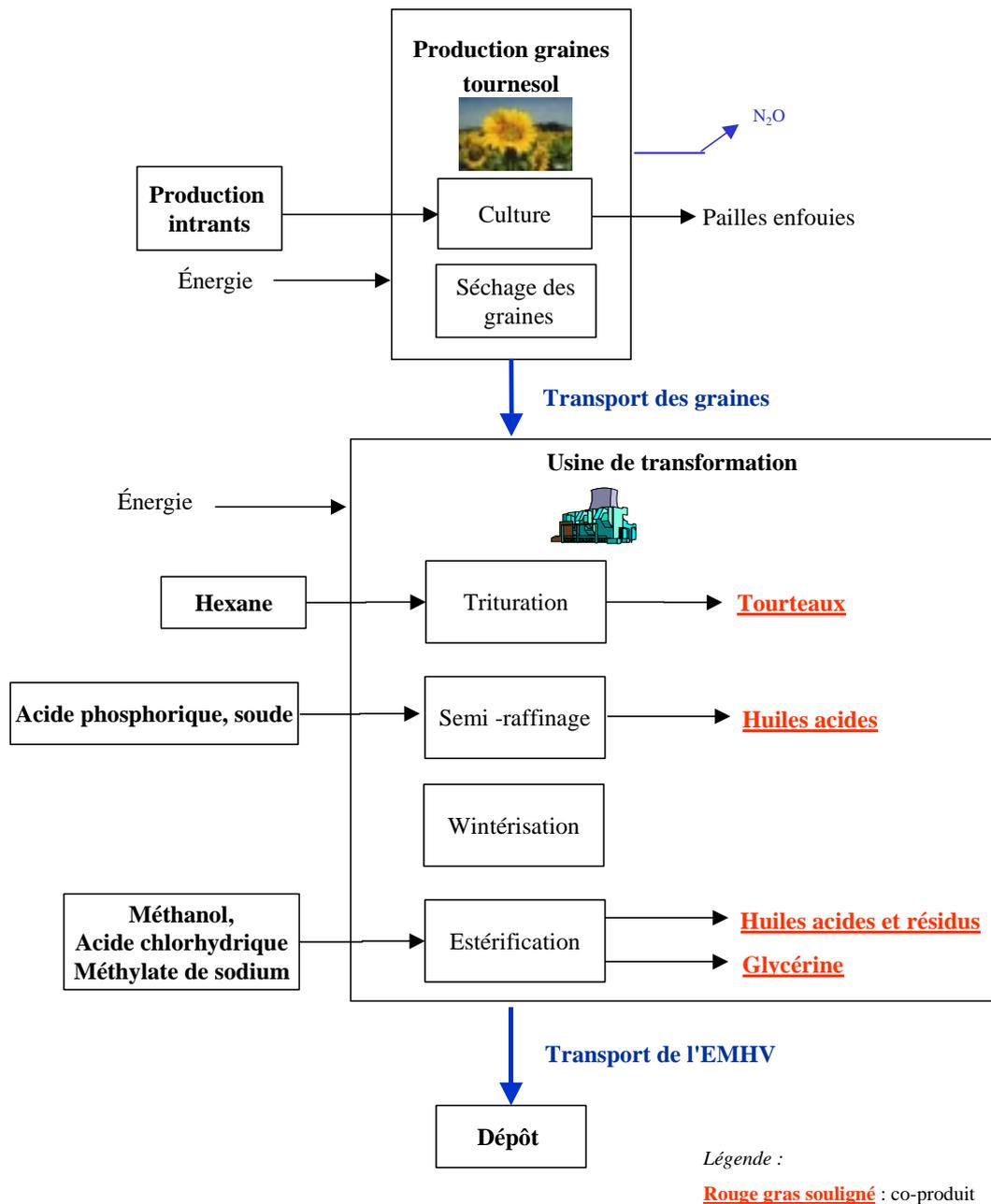
Puis, le transport depuis la raffinerie jusqu'au dépôt régional est supposé s'effectuer à l'identique du transport des essence et gazole depuis la raffinerie (cf. paragraphe 10.2.3).

¹² Le détail des surconsommations de chacun des produits consommés n'est pas détaillé dans cette équation.

13 FILIERE TOURNESOL

De la même façon que pour la filière colza, la filière tournesol a été étudiée par Ecobilan en collaboration avec le CETIOM, l'ITERG et la société SAIPOL. Toutes les données utilisées pour le calcul des bilans énergétiques et gaz à effet de serre ont été fournies et validées par le CETIOM pour la partie amont agricole et par la société SAIPOL pour les étapes de transformation industrielles.

13.1 Schéma des frontières du système



13.2 Description des étapes de la filière

13.2.1.1 *Itinéraire cultural*

Le rendement par hectare obtenu sur le tournesol est de 24,4 q/ha. Ce rendement a été évalué par le CETIOM à partir de la courbe de tendance d'évolution du rendement tournesol depuis 1970.

Les principales étapes de l'itinéraire moyen sont les suivantes :

- épandage des engrais solides : les quantités d'engrais sont, par hectare, de 39 unités d'azote (50 unités sur 78% des parcelles). Concernant les engrais P et K, ceux-ci sont considérés comme une fumure de fond utilisée par l'ensemble des cultures de la rotation. Le raisonnement pour la prise en compte des engrais P et K est le même que pour la culture de colza en prenant un teneur en P_2O_5 dans les graines de tournesol de 1,2% et en K_2O dans les graines de tournesol de 0,9% ainsi qu'une teneur des pailles de tournesol de 0,19% en P_2O_5 et 2,9% de K_2O .
- déchaumage de la culture précédente ;
- labour : le pourcentage moyen de labour est de 85 % ;
- semis : la densité moyenne de semis est de 70 000 graines/ha ;
- binage – désherbage : le pourcentage moyen de binage est de 40% ;
- protection phytosanitaire : les apports de produits phytosanitaires moyen sont de 2,1 kg de matière active par hectare avec la répartition suivante : 81% d'herbicides, 5% de fongicides et 14% d'insecticides ;
- récolte ;
- broyage.

Le temps de passage des machines agricoles est en moyenne de 7,2 heures totales pour un hectare toutes étapes confondues. Le nombre moyen de passages est de 16,2.

La totalité des pailles est enfouie. Les teneurs en pourcentage de matière sèche de ces pailles en azote, phosphore et potassium sont de : 1,1% N, 0,19% P_2O_5 et 2,9% K_2O .

L'enfouissement des pailles permet d'enrichir le sol en azote, phosphore et potassium. De la même façon que pour la culture de colza, il a été considéré que l'enfouissement des pailles permet une économie d'engrais P et K sous forme minérale pour la culture suivante. En ce qui concerne l'azote, la minéralisation des pailles de tournesol ne permet pas de réduire la fertilisation de la culture suivante.

En tenant compte du contenu en P et K est produits de la culture (paille et graine) et du gain en P et K du fait de l'enfouissement des pailles, il a été considéré que l'apport « net » de P_2O_5 et K_2O provenant de la fumure de fond est de 29 kg de P_2O_5 et 22 kg de K_2O (29 kg P_2O_5 = 2440 kg graines * 1,2% et 22 kg K_2O = 2240 kg graines * 0,9%).

Notons que moins de 5 % des surfaces de tournesol sont irriguées.

13.2.1.2 *Transport des graines jusqu'au site de transformation*

Les graines sont transportées en vrac en camion jusqu'aux sites de trituration, en moyenne sur 300 km (environ le double du colza).

Le transport s'effectue sans retour à vide.

13.2.1.3 *Transformation du tournesol en huile*

Cette transformation s'effectue pour le tournesol à l'identique du colza, avec cependant un rendement différent, lié au contenu en huile des graines.

Aussi, la règle d'imputation massique (au pro rata de la matière sèche), conduit à imputer 49% des consommations et émissions de l'étape à la production d'huile brute.

Comme pour le colza, la trituration du tournesol est suivie d'une étape de semi-raffinage. Cette étape est imputée à 97% à la production d'huile neutre (du fait de la production d'huiles acides, co-produit valorisé dans l'industrie).

13.2.1.4 *Transport de l'huile depuis les sites de trituration jusqu'au site de Boussens de synthèse d'EMHV de tournesol*

Seuls trois sites en France triturent des graines de tournesol, qui serviront à produire de l'EMHV de tournesol sur le site de Boussens¹³ : Bordeaux, Sète et St Nazaire.

Aussi, le transport moyen retenu correspond à la moyenne d'approvisionnement entre ces trois sites, soit près de 450 km par camion sans retour à vide.

13.2.1.5 *Transformation de l'huile en EMHV*

Cette étape est identique à celle décrite pour le colza (cf. paragraphe 12.2.1.4.).

13.2.1.6 *Distribution des produits jusqu'aux dépôts régionaux*

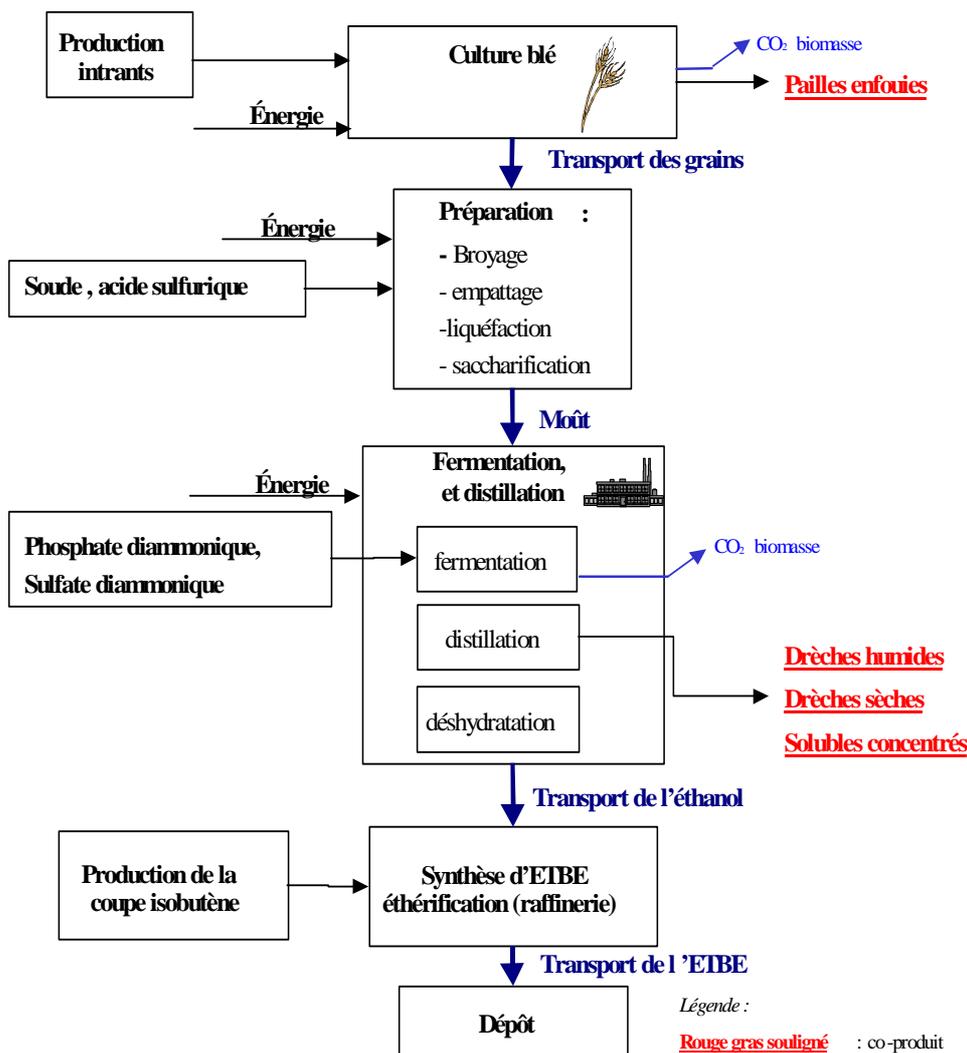
Cette étape est identique à celle décrite pour le colza (cf. paragraphe 12.2.1.5.).

¹³ Le site de Boussens n'effectue que l'estérification des produits et ne triture pas les graines. Il s'approvisionne en huile à partir de différents sites de trituration.

14 FILIERE BLE

L'ensemble de cette filière a été étudié par Ecobilan en collaboration avec l'ITCF et la société BENP. Les données utilisées pour le calcul des bilans énergétiques et gaz à effet de serre de cette filière ont été fournies et validées par l'ITCF et BENP.

14.1 Schéma des frontières du système



14.2 Description des étapes de la filière

14.2.1.1 Itinéraire cultural

Rappelons que l'itinéraire technique « moyen » pour la culture de blé a été défini à partir de trois itinéraires techniques retenus, correspondant à trois départements (Eure et Loire, Marne et Somme) des principales régions productrices : la Beauce, la Champagne et la Picardie.

Les principales étapes de l'itinéraire moyen sont les suivantes :

- déchaumage de la culture précédente ;
- destruction des repousses de colza (culture précédente) favorisées dans certaines régions ;
- labour ;
- semis (avec traitement insecticide) ;
- application d'azote ;
- désherbage ;
- protection phytosanitaire (fongicide et herbicide) ;
- lutte contre la verse ;
- récolte ;
- récolte des pailles (la mécanisation de cette étape a été entièrement allouée au co-produit paille).

Le détail des résultats obtenus sur les trois départements et les valeurs retenues pour l'itinéraire "moyen" sont présentés dans le tableau suivant :

2001	Beauce	Marne	Somme	valeurs moyennes
Surfaces (ha)	194000	172000	182000	
Rendement 2001 (qt/ha)	90	90	90	90
% pailles exportée 2001	20%	0%	20%	14%
Doses d'azotes 2001	178.0	186.9	187.2	183.8
Phytosanitaires : kg/ha	1.92	2.69	3.95	2.84
<i>Herbicide</i>	0.3	1.3	1.1	0.9
<i>Fongicide</i>	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Insecticide</i>	0.2	0.1	0.2	0.2
<i>Substance croissance</i>	1.2	1.0	2.3	1.5
Temps de passage tracteur	3.47	3.47	3.18	3.37
Nb passages d'automotrice	1.00	1.00	1.00	1.00
Nb passages d'outils	12.51	14.70	14.03	13.70
% Labour / non labour	50%	62%	63%	58%
% irrigation de la culture de blé	50%	0%	0%	18%

Le rendement par hectare a été estimé à 90 qt/ha pour les trois régions considérées à partir d'une courbe de tendance construite sur les rendements réels des 50 dernières années.

Sur les régions Beauce et Somme, une partie des pailles est récoltée sur 20% des surfaces. En moyenne, la récolte des pailles de blé a été prise en compte sur 14% des surfaces. On comptabilise 3 tonnes de paille exportables sur les 6 tonnes produites par ha pour un rendement en grain de 90 quintaux. Il a donc été considéré que 420 kg de paille était exportée par hectare en moyenne.

Le temps de passage des machines agricoles est en moyenne 5,1 heures totales pour un hectare toutes étapes confondues. Le nombre moyen de passages est de 13,7.

Une partie des parcelles de blé est irriguée en Beauce (environ 50% d'après les chiffres des cinq dernières années). En moyenne, 45 mm d'eau sont apportés par ha et par an.

Du fait de la récolte des pailles dans certaines régions, seulement 86 % des pailles ont été considérées comme restituées au sol ainsi que 100% des chaumes (3 tonnes / ha).

Afin de comptabiliser les impacts évités liés à l'enfouissement des chaumes et des pailles, les teneurs suivantes ont été prises en compte : 1,2 kg de P₂O₅ et 1,8 kg de K₂O par quintal de matière sèche de paille ou chaume enfouie (avec un teneur en matière sèche de 86%). En revanche, de la même façon que pour la culture de colza, l'impact évité lié à l'enfouissement des pailles n'a donc pas été pris en compte pour l'azote.

Afin de comptabiliser les apports « nets » d'engrais P et K, nous avons tenu compte d'une teneur des grains de 0.9 kg P₂O₅/qt MS et de 0.5 kg K₂O/qt MS (avec une moyenne de 88% de MS dans les grains). De plus, une partie des pailles étant exportée, le contenu en P₂O₅ et K₂O des pailles exportées a également été comptabilisé en tenant compte de leur teneur en P et K (cf. ci-dessus). Les apports « net » d'engrais P et K retenu pour la culture de blé sont donc :

- P₂O₅ : 90 qt grains * 0,9 * 88% + 4,2 qt pailles exportées * 1,2 * 86% = 76 kg
- K₂O : 90 qt kg grains * 0,5 * 88% + 4,20 qt pailles exportées * 1,8 * 86% = 46 kg

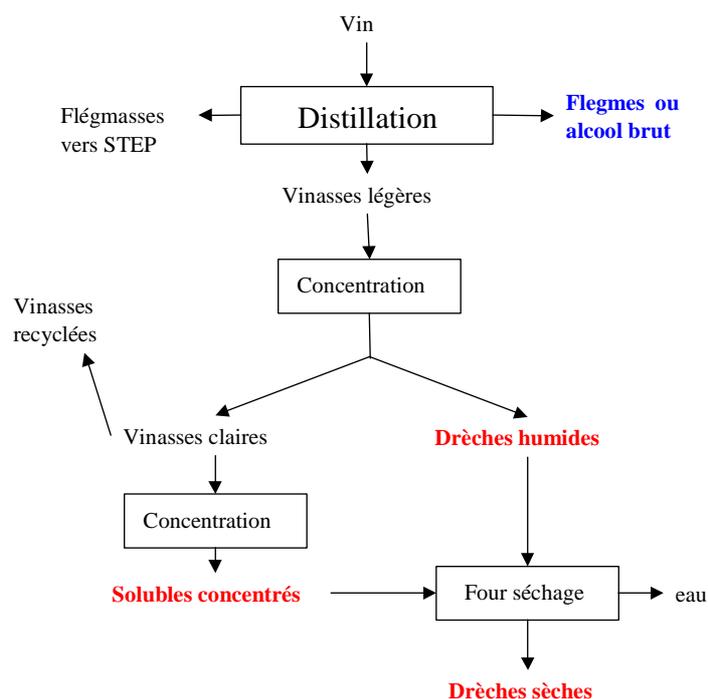
14.2.1.2 *Approvisionnement en blé*

D'après le site de BENP, le blé est transporté par route dans des camions 25 tonnes. Le rayon moyen d'approvisionnement considéré est de 16,5 km.

14.2.1.3 *Transformation industrielle du blé en éthanol*

Les principales unités de transformations industrielles du blé en éthanol sont les suivantes :

- **Etape de préparation du moût de fermentation** : broyage des grains et obtention de la farine entière, ajout d'eau pour l'étape d'empattage, ajout d'enzyme et de soude pour l'étape de liquéfaction et ajout d'enzymes pour l'étape ultime de saccharification afin de transformer l'amidon en molécules de glucose ;
- **Fermentation du moût et production de vin** : l'unité de fermentation utilisée fonctionne en continu (plusieurs cuves de fermentation sont installées en parallèle) : obtention d'un vin à 10-11% d'alcool ;
- **Distillation du vin (voir schéma ci-dessous)** : obtention des flegmes (ou alcool brut) à 93% d'alcool, de flegmasses envoyées en station d'épuration pour l'obtention de boues et de vinasses légères contenant les résidus insolubles (fibres). Les vinasses sont ensuite décantées et centrifugées afin d'obtenir d'une part, des vinasses claires débarrassées des fibres et d'autre part des drèches humides (à environ 30% de MS). Une partie des vinasses claires est recyclée dans le process, l'autre partie est envoyée en concentration pour former des solubles concentrés. Les solubles concentrés et drèches humides sont ensuite séchés dans un four afin de former le co-produit ultime : les drèches sèches.
- **Déshydratation de l'alcool brut (ou flegmes) sur tamis moléculaire** : production d'éthanol à 99,7% d'alcool.

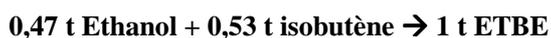


14.2.1.4 Transport de l'éthanol vers la raffinerie

L'éthanol est transporté par rail jusqu'aux raffineries de Feyzin et Dunkerque ; la distance moyenne de transport considérée dans l'étude est de 350 km.

14.2.1.5 Etape de synthèse de l'ETBE

La synthèse de l'ETBE en raffinerie s'effectue selon le bilan suivant :



Les consommations énergétiques sont de 53.2 kWh électrique par tonne d'ETBE, et de 5.1 tonnes de vapeur par heure (avec une production horaire de 7.4 t d'ETBE).

14.2.1.6 Etape de distribution de l'éthanol et l'ETBE jusqu'aux dépôts régionaux

Cette étape est identique à celle décrite pour les carburants classiques.

15 FILIERE BETTERAVE

L'ensemble de cette filière a été étudié par Ecobilan en collaboration avec l'ITB et l'UCB. Les données relatives à la filière betterave ont été fournies et validées par l'ITB et l'UCB.

15.1 Schéma des frontières du système

La synthèse d'éthanol à partir de betterave nécessite une étape préalable de préparation des substrats. Selon les distilleries, l'éthanol est produit à partir de différents substrats : jus vert de diffusion, sirop, égout pauvre ou mélasse. Le site d'Arcis sur Aube produit de l'éthanol en période de campagne betteravière principalement à partir du jus de diffusion, substrats périssable. En période d'inter-campagne, seules les distilleries couplées à des sucreries produisent de l'alcool en utilisant des substrats issus de la sucrerie (sirop, égout pauvre ou mélasse). C'est le cas sur le site d'Arcis sur Aube. Les schémas ci-dessous présentent les étapes de production en distinguant les deux périodes : campagne betteravière et inter-campagne.

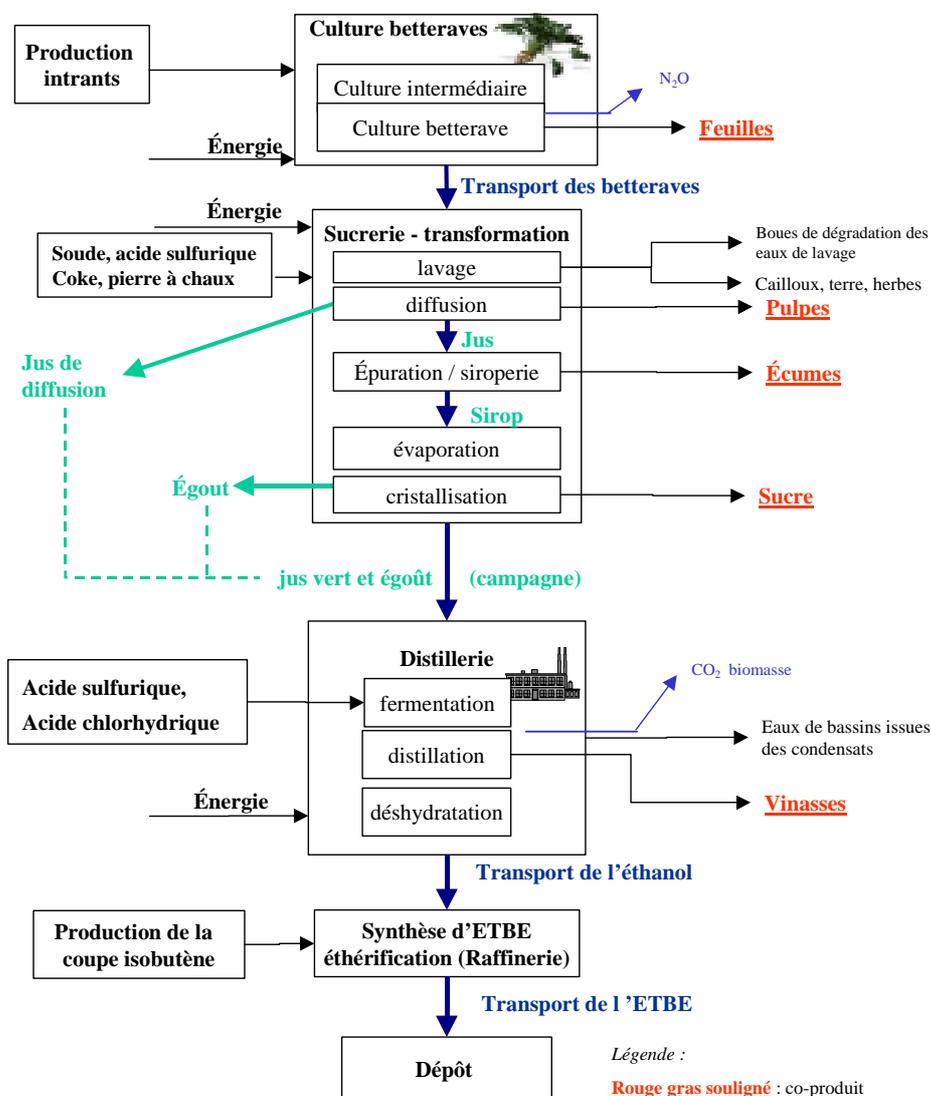


Schéma des étapes de la filière de production de l'éthanol et l'ETBE à partir de betterave en période de campagne betteravière

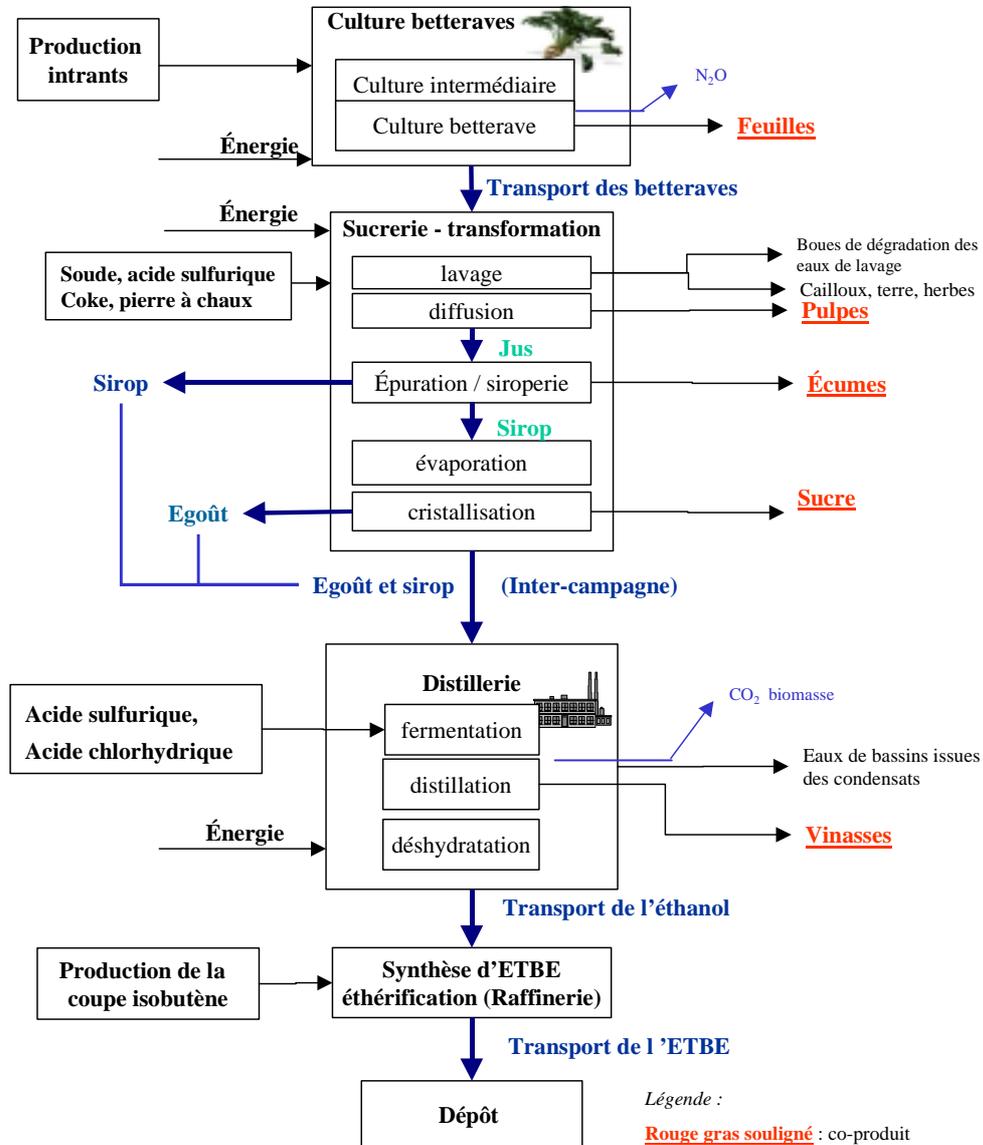


Schéma des étapes de la filière de production de l'éthanol et l'ETBE à partir de betterave en période d'inter-campagne

15.2 Description des étapes de la filière

15.2.1.1 Itinéraire cultural

L'itinéraire technique retenu pour la culture de betterave correspond aux pratiques moyennes nationales.

Les principales étapes de l'itinéraire moyen sont les suivantes :

- application de vinasses concentrées (apport de K et N) ;
- déchaumage de la culture précédente ;
- mise en place et conduite d'une culture intermédiaire de moutarde ;
- épandage d'engrais P ;
- labour ;
- épandage d'engrais N ;
- préparation du sol ;
- semis ;
- protection phytosanitaire (insecticides, fongicides) ;
- récolte.

Le détail des résultats obtenus sur les trois départements et les valeurs retenues pour l'itinéraire "moyen" sont présentés dans le tableau suivant :

2001	valeurs moyennes
Surfaces (ha)	
Rendement 2003 (qt/ha)	66.24
Doses d'azotes	140.0
Phytosanitaires : kg/ha (moyenne 2001)	3.72
<i>Herbicide</i>	2.35
<i>Fongicide</i>	1.20
<i>Insectide</i>	0.16
Temps de passage tracteur	5.40
Nb passages d'automotrice	1.12
Nb passages d'outils	15.98
% Labour / non labour	96%
% irrigation de la culture de betterave	11.5%

Le rendement 2003 est estimé en se basant sur l'estimation du rendement de l'année 2002 qui prend en compte la moyenne des rendements sur la période 1997-2001 et en appliquant une amélioration annuelle du rendement de 1,9% (courbe de tendance des rendements établies sur les 20 dernières années). Le rendement retenu correspond à 66,24 tonnes de betteraves par ha pour des betteraves à 17,7% de richesse en sucre.

Le temps de passage des tracteurs est en moyenne 5,4 heures pour un hectare. Le nombre moyen de passages est d'environ 17.

Environ 11,5% des surfaces de betterave sont irriguées en France. En moyenne, l'apport d'eau est estimé à 120 mm d'eau apportée à l'ha (3 tours d'eau de 40 mm).

Pour un rendement de 66 tonnes de betterave, environ 44 tonnes de verts (à 10% de matière sèche), résidus de culture (feuilles de betteraves) sont restitués au sol. L'impact évité lié à

L'enfouissement des verts prend en compte des teneurs suivantes en pourcentage de matière sèche : 0,6% de P₂O₅ et 4,5% K₂O.

L'impact évité lié à la teneur en N des résidus a été pris en compte dans le cas de la culture de betterave : en effet, l'azote contenu dans les résidus (2% par rapport à la MS) est bien valorisé par la culture suivante (céréale) puisqu'elle est implantée très rapidement après la récolte (environ deux semaines). Il a été considéré que 60% de l'azote contenu dans les résidus était réutilisé par la culture suivante ; ceci permet d'éviter l'apport d'une quantité équivalente d'engrais azoté sous forme minérale.

Afin de comptabiliser les apports « nets » d'engrais N, P et K, le calcul est le suivant :

- N : apport d'azote – azote restitué au sol du fait de l'enfouissement des pailles et valorisé = 140 unités d'azote – 44 tonnes verts * 10% MS * 2%N * 60% de l'azote valorisé = 87 kg N
- P₂O₅ : apport de P₂O₅ - phosphore restitué au sol du fait de l'enfouissement des pailles = 90 kg / ha – 44 tonnes verts * 10% MS * 0,6% = 64 kg
- K₂O : apport de K₂O - potassium restitué au sol du fait de l'enfouissement des pailles = 378 kg / ha – 44 tonnes verts * 10% MS * 4,5% = 180 kg

15.2.1.2 Approvisionnement en betterave

L'approvisionnement du site d'Arcis en betterave se fait par route dans des camions de 25 tonnes. Le rayon moyen d'approvisionnement considéré est d'environ 30 km. Ceci est cohérent avec la moyenne nationale d'approvisionnement.

15.2.1.3 Transformation industrielle des betteraves en éthanol

La synthèse d'éthanol à partir de betterave du site d'Arcis est effectuée en période de campagne betteravière principalement à partir du jus vert, substrat dont la pureté en sucre est d'environ 91,3% de sa matière sèche (14,8%), additionné d'égout pauvre, d'une pureté de 81,9% pour une teneur en matière sèche de 70,7%. En période d'inter-campagne, le site d'Arcis produit l'alcool à partir de substrats de sucrerie produits en période de campagne : l'égout pauvre et le sirop (pureté de 93,6% pour 68,5% de matière sèche).

Afin de refléter une situation représentative des distilleries françaises, la répartition des substrats issus de la sucrerie et utilisés en distillerie retenue pour l'étude correspond à la moyenne nationale à savoir :

- JUS VERT : 44% ;
- SIROP : 21% ;
- EGOUT PAUVRE : 33% ;
- MELASSE : 2% ;

Une partie de l'égout pauvre étant utilisé en campagne, nous avons considéré la répartition suivante :

- 54,7% de l'éthanol produit en période de campagne betteravière à partir de jus vert et d'égout pauvre ;
- 45,3 % de l'éthanol produit en intercampagne, à partir de sirop et d'égout pauvre.

La synthèse des substrats suit les étapes suivantes :

- **Lavage et étape de râperie** : découpe des betteraves en cossettes ;

- **Etape de diffusion** : production d'un jus de diffusion qui se charge en sucre, appelé jus vert et des pulpes, co-produit valorisé en alimentation animale ; cette étape consomme de l'eau en grande quantité ainsi que de l'acide et de la soude ;
- **Etape de siroperie** : évaporation et épuration du jus de diffusion pour produire un substrat très riche en sucre, le sirop ; cette étape produit également des écumes valorisées en agriculture (épandage) ; ce co-produit est stabilisé dans un four à coke où il subit une étape de décarbonatation qui nécessite l'emploi de pierre à chaux ;
- **Etape de cristallisation** : production de sucre et d'un co-produit égout, encore riche en sucre mais contenant toutes les impuretés (« non sucre ») ; la particularité de cette étape sur le site d'Arcis est que la cristallisation n'est pas complète (2 jets contre 3 jets en règle générale) et permet d'obtenir un co-produit du sucre encore riche en sucre polarisable et bien valorisable en distillerie.

L'ensemble de ces étapes nécessite de l'énergie sous forme de vapeur.

Ces substrats sont ensuite envoyés en distillerie :

- **Fermentation** : Une première étape de fermentation en cascade permet d'obtenir un vin à 10,5% de teneur volumique en alcool ; cette étape nécessite de l'énergie électrique pour alimenter les pompes qui permettent la fermentation en cascade ; la fermentation nécessite un circuit d'eau de refroidissement, bouclé à un aérorefrigérant également consommateur d'électricité. Le CO₂ d'origine fermentaire (d'origine biomasse) est lavé et rejeté dans l'atmosphère. Le vin est centrifugé et délevuré ;
- **Distillation** : l'étape suivante consiste à distiller le vin afin d'obtenir un alcool brut ; la particularité du site d'Arcis est que les colonnes à distiller sont couplées ce qui permet une économie d'énergie sous forme de vapeur : les vapeurs d'alcool de la première colonne à distiller sont réinjectées dans la deuxième colonne à distiller ; l'étape conduit à la production de vinasses, recyclées en période de campagne betteravière au niveau de la sucrerie (atelier de diffusion) ou bien concentrées en période d'intercampagne afin d'obtenir un produit valorisable en agriculture (épandage),
- **Déshydratation** : l'alcool brut obtenu est ensuite déshydraté sur un tamis moléculaire ; cette étape consomme principalement de la vapeur.

L'ensemble des étapes de sucrerie et distillerie consomment de la vapeur produite, sur le site d'Arcis sur Aube, à partir d'une chaudière à gaz naturel, produisant également de l'électricité.

15.2.1.4 Transport de l'éthanol vers la raffinerie

L'éthanol est transporté par rail jusqu'à la raffinerie de Feyzin ; la distance moyenne de transport considérée dans l'étude est d'environ 300 km.

15.2.1.5 Etape de synthèse de l'ETBE

L'étape de synthèse de l'ETBE est présentée précédemment dans le paragraphe correspondant pour la filière ETBE de blé.

15.2.1.6 Etape de distribution de l'éthanol et l'ETBE jusqu'aux dépôts régionaux

Cette étape est identique à celle décrite pour les carburants classiques (cf. paragraphe 9.1.2.2).

16 EXPLICATION DES BILANS ENERGETIQUES PAR HA DES DIFFERENTES CULTURES

Ces bilans énergétiques par hectare s'appuient sur des données fournies par les différents instituts techniques : le CETIOM pour les cultures de colza et tournesol, l'ITC pour la culture de blé et l'ITB pour la culture de betterave.

16.1 Culture de colza

La culture de colza représente une mobilisation énergétique exprimée en énergie non renouvelable d'environ 19 000 MJ par ha (pour un rendement de 33.4 quintaux par ha, et un itinéraire technique décrit au paragraphe 12.2.1.1).

Cette mobilisation énergétique est liée à près de 50% aux apports en engrais azotés, et à 40% à la mécanisation.

Les consommations de mécanisation sont liées pour moitié aux consommations du tracteur (qui passe en moyenne 7.8 h par ha, et consomme 12 litres de carburant par heure), et pour moitié aux surconsommations en carburant induites par les outils tractés (18 passages d'outils, générant en moyenne une surconsommation de 5 litres de carburant par passage).

Colza		Quantité	Energie MJ / unité	Energie non renouvelable MJ/ha	%
Engrais N	170 kg N	48.4 - 64.4	8900	48%	
Engrais P	43 kg P2O5	18,3	810	4%	
Engrais K	33 kg K2O	11,6	390	2%	
Phytoprotecteurs	3,7 kg MA	175 - 576	1100	6%	
Mécanisation					
tracteur	7,83 h 12,0 l/h	39.3 MJ/litre	3600	18%	
automotrice	1,00 ha 15,00 l/ha	39.3 MJ/litre	590	3%	
outils tractés	18,00 ha 5,10 l/ha	39.3 MJ/litre	3600	18%	
<i>sous total mécanisation</i>	201		7890	40%	
Total			19000	100%	

Note ⁽¹⁾ : les échelles fournies correspondent aux différents types de fertilisant qui peuvent être utilisés. Ainsi, le contenu énergétique de N ammonitrate est de 48.4 MJ/kg, tandis que N urée est de 64.7, et nitrate d'ammoniaque de 55.8 MJ/kg. De la même façon, l'énergie de production des matières actives phytoprotecteurs varient entre 175 et 576 MJ/kg de matière active (source de données : Gaillard, G. et al., 1997 : Inventaire environnemental des intrants agricoles en production végétale). Ainsi, en moyenne, les consommations d'énergie non renouvelables pour la production de molécules phytoprotecteurs sont :

- 175 MJ/kg de matière active de type fongicide,
- 256 MJ/kg de matière active de type herbicide,
- 241 MJ/kg de matière active de type régulateur de croissance,
- 576 MJ/kg de matière active de type insecticide.

16.2 Culture de tournesol

La culture de tournesol représente une mobilisation énergétique exprimée en énergie non renouvelable de 10 620 MJ par ha (pour un rendement de 24.4 quintaux par ha, et un itinéraire technique décrit au paragraphe 13.2.1.1).

Cette mobilisation énergétique est liée à près de 70% à la mécanisation, et à près de 20% aux apports en engrais azotés.

La part de la mécanisation dans le bilan énergétique de la culture de tournesol est très supérieure à celle de la culture de colza, du simple fait que les apports en engrais sont nettement plus faibles sur le tournesol, en comparaison avec le colza.

Les consommations de mécanisation sont liées pour moitié aux consommations du tracteur (qui passe en moyenne 7 h par ha, et consomme 12 litres de carburant par heure), et pour moitié aux surconsommations en carburant induites par les outils tractés (12 passages d'outils, générant en moyenne une surconsommation de 6.5 litres de carburant par passage).

Tournesol	Quantité		Energie MJ / unité	Energie non renouvelable (MJ/ha)	%
Engrais N	39	kg N	48,4 - 64,4	1900	18%
Engrais P	30	kg P2O5	18,3	540	5%
Engrais K	22	kg K2O	11,6	250	2%
Phyosanitaires	2	kg MA	175 - 576	630	6%
Mécanisation					
tracteur	7,00	h	39.3 MJ/litre	3300	31%
	12,0	l/h			
automotrice	1,00	ha	39.3 MJ/litre	600	6%
	15,00	l/ha			
outils tractés	12,00	ha	39.3 MJ/litre	3100	29%
	6,50	l/ha			
sous total mécanisation	177			7300	69%
Total				10620	100%

16.3 Culture de blé

La culture de blé représente une mobilisation énergétique exprimée en énergie non renouvelable de 16 500 MJ par ha (pour un rendement de 90 quintaux par ha, et un itinéraire technique décrit au paragraphe 14.2.1.1).

Cette mobilisation énergétique est liée à près de 60% aux apports en engrais azotés, et à 30% à la mécanisation.

Les consommations de mécanisation sont liées pour moitié aux consommations des tracteurs qui passent en moyenne 3,4 h par ha, et consomment 14 litres de carburant par heure), pour un tiers aux surconsommations en carburant induites par les outils tractés (13 passages d'outils, générant en moyenne une surconsommation de 3,2 litres de carburant par passage). Le complément est lié à la consommation en carburant de la machine automotrice pour la récolte (1 passage générant une consommation de 17 litres de carburant par passage) ainsi que la consommation d'huile pour les moteurs des tracteurs.

Blé	Quantité	Energie MJ / unité	Energie non renouvelable (MJ/ha)	%
Engrais N	184 kg N	48.4 - 55.8	9700	57%
Engrais P	46 kg P2O5	18,3	1350	8%
Engrais K	76 kg K2O	11,6	530	3%
Phytosanitaires	2,8 kg MA	175 - 576	730	4%
Mécanisation				
tracteur	3,37 h 14,0 l/h	39.3 MJ/litre	1900	12%
automotrice	1,00 ha 17,00 l/ha	39.3 MJ/litre	700	4%
outils tractés	13,30 ha 3,20 l/ha	39.3 MJ/litre	1700	10%
<i>sous total mécanisation</i>	107 litres		4800	29%
Total (avant allocation)			16900	100%
Total			16500	

16.4 Culture de betterave

La culture de betterave représente une mobilisation énergétique exprimée en énergie non renouvelable de 16 900 MJ par ha (pour un rendement de 66,24 tonnes de betterave à 17,7% sucre par ha, et un itinéraire technique décrit au paragraphe 15.2.1.1).

Cette mobilisation énergétique est liée à près de 30% aux apports en engrais azotés, et à 45% à la mécanisation.

Les consommations de mécanisation sont liées pour environ la moitié aux consommations des tracteurs qui passent en moyenne 5,4 h par ha, et consomme 15 litres de carburant par heure), pour moitié aux surconsommations en carburant induites par les outils tractés (16 passages d'outils, générant en moyenne une surconsommation de 5,3 litres de carburant par passage). Le complément est lié à la consommation en carburant des machines automotrices pour la récolte et l'épandage d'engrais (1,1 passage générant une consommation de 15,6 litres de carburant par passage) ainsi que la consommation d'huile pour les moteurs des tracteurs.

Betterave	Quantité	Energie MJ / unité	Energie non renouvelable (MJ/ha)	%
Engrais N	87 kg N	48.4 - 64.4	5100	30%
Engrais P	64 kg P2O5	18,3	1170	7%
Engrais K	180 kg K2O	11,6	2100	12%
Phytosanitaires	4,6 kg MA	175 - 576	920	5%
Mécanisation				
tracteur	5,40 h 15,1 l/h	39.3 MJ/litre	3200	19%
automotrice	1,12 ha 15,60 l/ha	39.3 MJ/litre	700	4%
outils tractés	15,98 ha 5,30 l/ha	39.3 MJ/litre	3300	20%
<i>sous total mécanisation</i>	184 litres		7600	45%
Total			16900	100%

17 PRODUCTIVITE PAR UNITE DE SURFACE DES DIFFERENTES CULTURES

Ce paragraphe fournit les bilans matières des filières de production des huiles de colza et tournesol et de l'éthanol de blé et de betterave.

Ces bilans ont été calculés à partir des données fournies par les différents instituts techniques et institut de recherche pour les étapes amont (cultures) et par les données collectées sur les sites de production de biocarburants.

Ces bilans reflètent la productivité en biocarburant des différentes cultures (à savoir la quantité de biocarburants produite par hectare), sans tenir compte des allocations massiques entre les produits et les co-produits des filières.

Le rendement à l'hectare de la culture de blé considéré dans l'étude dans le scénario de référence s'élève à 90 quintaux. La productivité pour la filière blé est de **2,55 tonnes d'éthanol produit par hectare cultivé**.

Le rendement à l'hectare de la culture de colza considéré dans l'étude dans le scénario de référence s'élève à 33,4 quintaux. La productivité pour la filière colza est de **1,37 tonnes d'huile produite par hectare cultivé**.

Le rendement à l'hectare de la culture de tournesol considéré dans l'étude dans le scénario de référence s'élève à 24,4 quintaux. La productivité pour la filière colza est de **1,06 tonnes d'huile produite par hectare cultivé**.

Le rendement à l'hectare de la culture de betterave considéré dans l'étude dans le scénario de référence s'élève à 66,2 tonnes (pour une richesse moyenne en sucre des betteraves de 17,7%). La productivité pour la filière betterave est alors de **3,0 tonnes d'éthanol produite par hectare cultivé et de 3,7 tonnes de sucre**. Cette situation est la situation réelle.

Dans le cas où la production de betterave augmenterait et où la production de sucre, liée à la consommation stagne, alors les hectares de betterave nouveaux seront dédiés uniquement à la production d'éthanol. Aucune donnée site sur ce sujet n'a été collectée. Une donnée de référence moyenne ADEME fournit : 1 tonne de betterave à 16% de sucre donne 1 hl d'éthanol. Dans ce contexte, et dans les limites de précision de cette information, la productivité d'un hectare de betteraves serait de **5,78 tonnes d'éthanol**.

SECTION IV

Résultats des scénarios de référence

L'objet de cette section est de présenter les résultats des bilans énergétiques et gaz à effet de serre pour chaque produit étudié en distinguant les différentes étapes de production afin d'identifier celles qui contribuent le plus aux bilans. Le détail des résultats exprimés par kg et MJ de produit est présenté en Annexe III et IV.

18 CARBURANTS CLASSIQUES

18.1 Essence

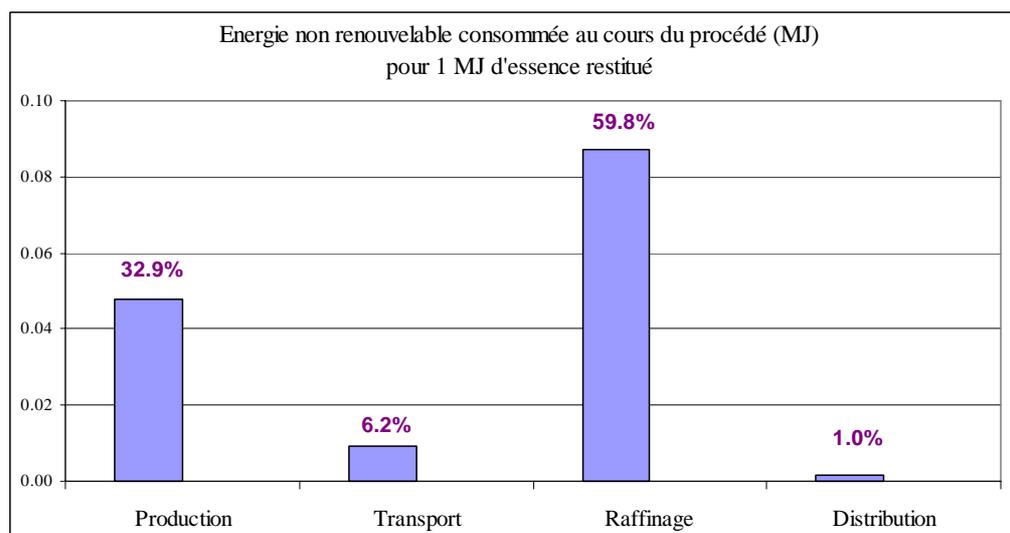
Indicateurs énergétiques :

0,87 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour l'extraction de pétrole, son transport, le raffinage en essence et la distribution au dépôt, d'essence aux spécifications 2005.

Cette mobilisation d'énergie intègre à la fois l'énergie contenue dans l'essence, et l'énergie consommée.

		Essence
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	1.15
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	48.7
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		0.873

L'énergie consommée au cours des différents procédés est de 0,15 MJ par MJ d'énergie restituée. Cette consommation d'énergie est liée à près de 60% à la transformation de pétrole en essence dans la raffinerie, et à près de 34% à l'extraction du pétrole.

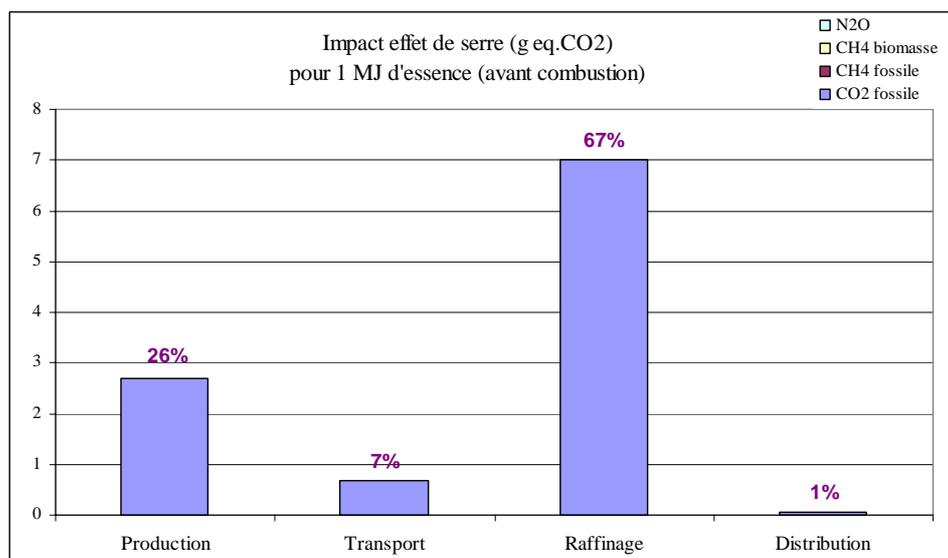


Indicateurs gaz à effet de serre :

La production d'essence et sa mise à disposition au dépôt de distribution représentent une contribution à l'effet de serre d'environ 440 g eq. CO₂ par kg d'essence, ou encore 10,5 g eq. CO₂ par MJ d'essence.

Les émissions de CO₂ contribuent à 99,7% à cet indicateur des émissions de gaz à effet de serre.

		Essence
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	10.5
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	444
Contribution effet de serre émissions CO2	%	99.7%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	0.24%



Les émissions de gaz à effet de serre (avant hypothèse de combustion) sont liées à 67% au raffinage, et à près de 26% à l'extraction du pétrole.

Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'essence, basée sur son contenu en carbone, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est d'environ 3 650 g eq. CO₂ par kg d'essence, ou encore 85,9 g eq. CO₂ par MJ d'essence brûlée.

<i>Avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone</i>		Essence
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO ₂ /MJ	85.9
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO ₂ /kg	3 653
Contribution effet de serre émissions CO₂	%	99.97%

18.2 Gazole

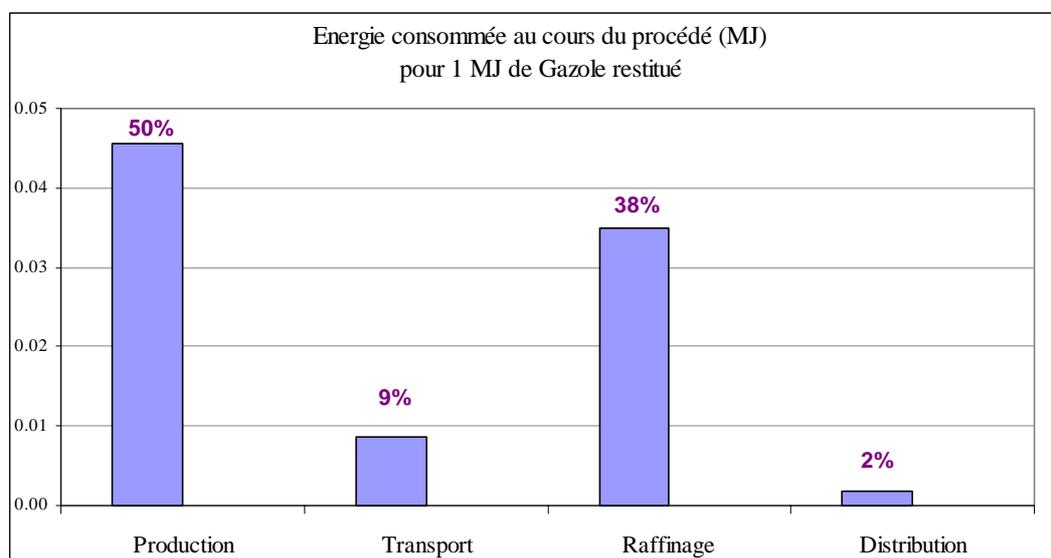
Indicateurs énergétiques :

0,92 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie mobilisée pour l'extraction de pétrole, son transport, le raffinage en gazole et la distribution au dépôt, du gazole aux spécifications 2005.

Cette mobilisation d'énergie intègre à la fois l'énergie contenue dans le gazole, et l'énergie consommée.

		Gazole
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	1.09
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	46.7
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		0.917

L'énergie consommée au cours des différents procédés s'élève à 0,09 MJ par MJ d'énergie restituée. Cette consommation d'énergie est liée à 40% à la transformation de pétrole en gazole dans la raffinerie, et à 50% à l'extraction du pétrole.



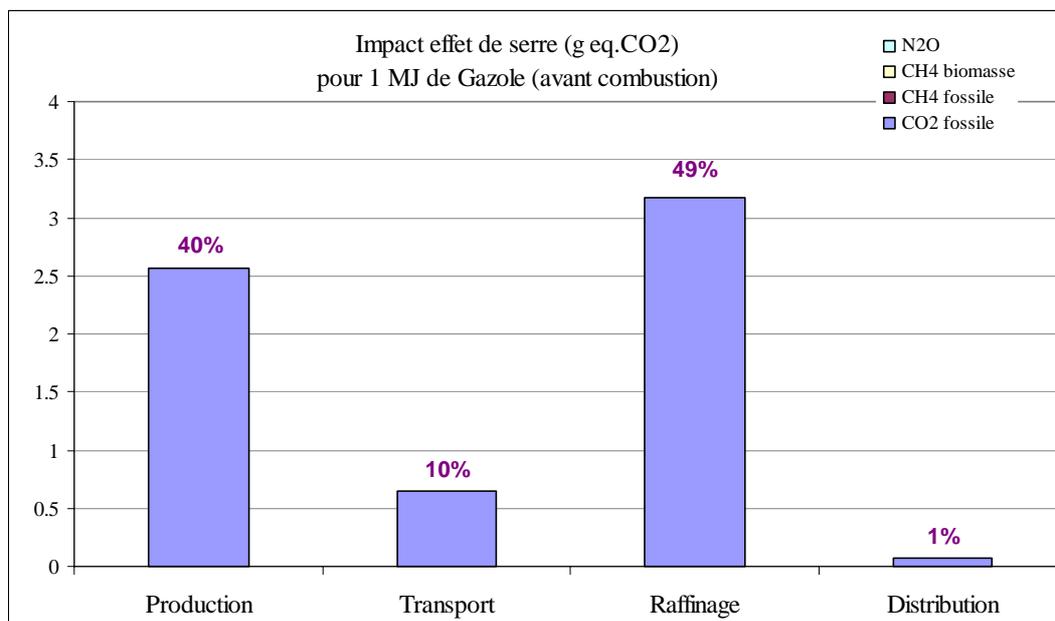
Indicateurs gaz à effet de serre :

La production de gazole et sa mise à disposition au dépôt de distribution représentent une contribution à l'effet de serre d'environ 280 g eq. CO₂ par kg de gazole, ou encore 6,48 g eq. CO₂ par MJ de gazole.

Les émissions de CO₂ contribuent à 99,6% à cet indicateur des émissions de gaz à effet de serre.

		Gazole
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	6.48
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	277
Contribution effet de serre émissions CO2	%	99.5%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	0.38%

Les émissions de gaz à effet de serre (avant hypothèse de combustion) sont liées à près de 50% à la transformation de pétrole en gazole dans la raffinerie, et à près de 40% à l'extraction du pétrole. Les étapes de transports (transport du brut et distribution) contribuent pour environ 10% au bilan global gaz à effet de serre.



Dans l'hypothèse d'une combustion totale du gazole, basée sur son contenu en carbone, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est d'environ 3 394 g eq. CO₂ par kg de gazole, ou encore 79 g eq. CO₂ par MJ de gazole brûlé.

		Gazole
<i>Avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone</i>		
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO ₂ /MJ	79.3
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO ₂ /kg	3 394
Contribution effet de serre émissions CO₂	%	99.96%

18.3 MTBE

Indicateurs énergétiques :

0,76 MJ d'énergie sont restitués sous forme de MTBE par MJ d'énergie mobilisée pour l'extraction de ressources (gaz naturel et pétrole essentiellement), leur transport, et leur transformation en méthanol, coupe isobutène ainsi que pour la synthèse de MTBE.

Cette consommation d'énergie est liée à 44% à la production de méthanol, à 33% à la production de la coupe isobutène, et à 23% à la synthèse du MTBE.

		MTBE
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	1.32
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	46.4
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		0.760

Indicateurs gaz à effet de serre :

La production du MTBE et sa mise à disposition au dépôt de distribution représentent une contribution à l'effet de serre de 630 g eq. CO₂ par kg de MTBE, ou encore 18 g eq. CO₂ par MJ de MTBE.

Les émissions de CO₂ contribuent à près de 97% à cet indicateur des émissions de gaz à effet de serre.

		MTBE
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	17.9
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	631
Contribution effet de serre émissions CO2	%	96.9%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	0.26%

Dans l'hypothèse d'une combustion totale du MTBE, basée sur son contenu en carbone, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est de 3 130 g eq. CO₂ par kg de MTBE, ou encore 88,9 g eq. CO₂ par MJ de MTBE brûlé.

		MTBE
<i>Avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone</i>		
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	88.9
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	3 131
Contribution effet de serre émissions CO2	%	99.4%

19 BIOCARBURANTS

19.1 Biocarburants : filière colza

19.1.1 Huile de colza

Indicateurs énergétiques :

Près de 4,7 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'huile de colza.

Cette performance énergétique peut se traduire comme une production nette (énergie restituée – énergie non renouvelable mobilisée) d'environ 9 MJ par m² de surface cultivée en colza.

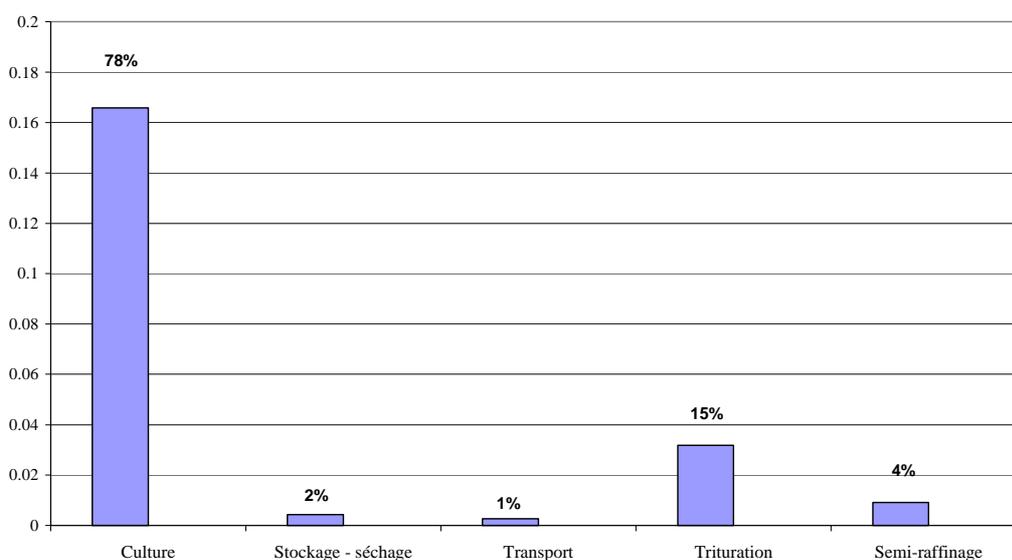
		Huile Colza
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0.214
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	7.95
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		4.68
Performance énergétique par surface	MJ/m ²	8.98

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- 78% pour l'étape de culture ;
- 15% pour l'étape de trituration.

Notons que l'étape de distribution finale n'a pas été prise en compte dans le bilan puisque la filière huile végétale ne possède pas encore d'étape de distribution de ses produits.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'huile de colza



Indicateurs gaz à effet de serre :

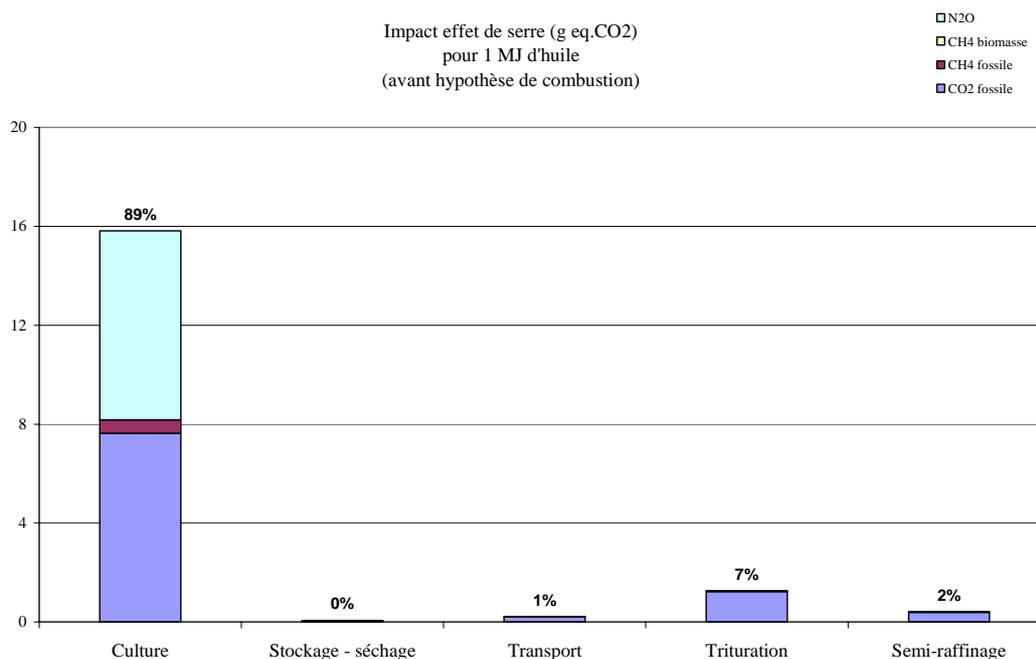
Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 660 g eq. CO₂ par kg d'huile de colza produite, ou encore de 17,8 g eq. CO₂ par MJ d'huile de colza produite.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à environ 54% aux émissions de CO₂, et à près de 43% aux émissions de N₂O liées à la culture du colza.

		Huile Colza
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	17.8
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	660
Contribution effet de serre émissions CO2	%	53.5%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	43.1%

L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à près de 90% à la culture du colza ;
- à 7% à l'étape de trituration.



Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'huile de colza, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est identique à celui avant combustion du produit : en effet, tout le carbone de l'huile qui est brûlée correspond à du carbone biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre.

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

		Huile Colza
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	17.8
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	660
Contribution effet de serre émissions CO2	%	53.5%

19.1.2 EMHV de colza

Indicateurs énergétiques :

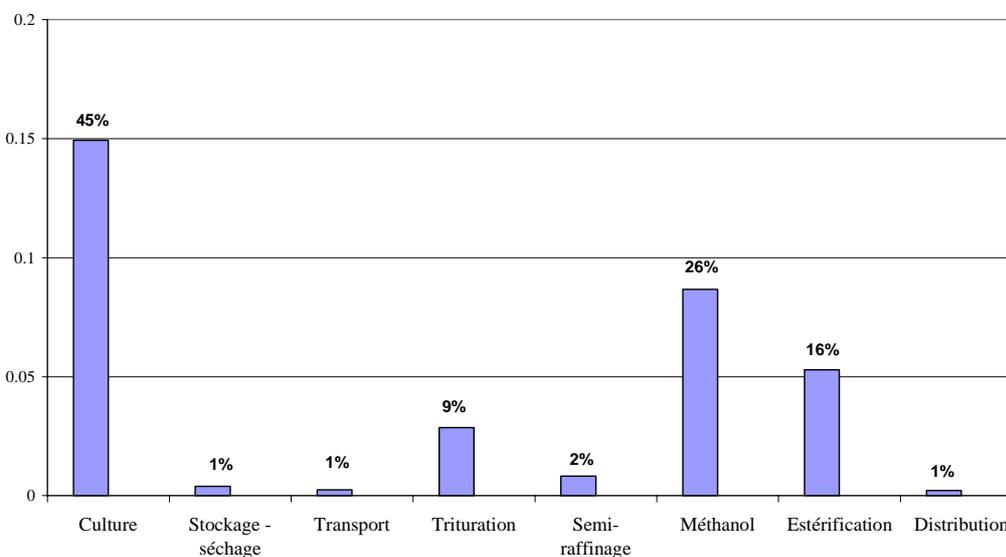
Près de 3 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'EMHV de colza.

		EMHV Colza
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0.334
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	12.5
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		2.99

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- 45% pour l'étape de culture ;
- 26% pour la fabrication du méthanol intégré dans l'EMHV ;
- 16% pour l'étape d'estérification (synthèse de l'EMHV à partir d'huile et d'EMHV) ;
- 8% pour l'étape de trituration.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'EMHV de colza



Indicateurs gaz à effet de serre :

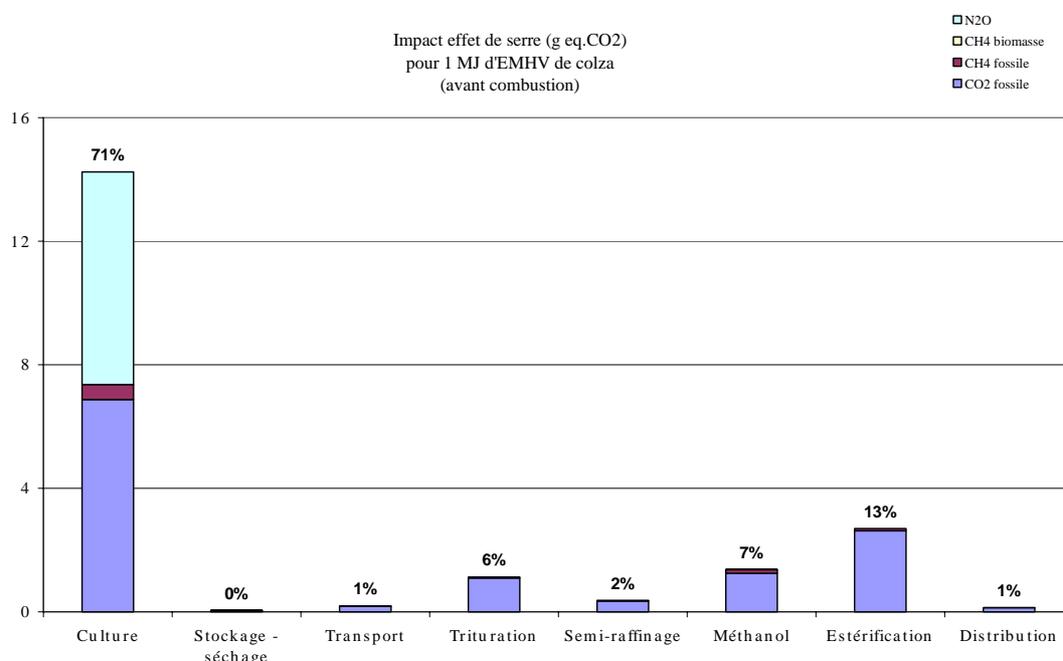
Les émissions de gaz à effet de serre sont de 755 g eq. CO₂ par kg d'EMHV de colza produit, ou encore de 20,2 g eq. CO₂ par MJ d'EMHV de colza produit.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à environ 62% aux émissions de CO₂, et à 35% aux émissions de N₂O liées à la culture du colza.

		EMHV Colza
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	20.2
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	755
Contribution effet de serre émissions CO2	%	62.2%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	34.2%

L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à plus de 70% à la culture du colza ;
- à 13% à l'étape d'estérification ;
- à 7% à la production du méthanol ;
- à 5% à l'étape de trituration.



Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'EMHV de colza, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre se voit augmenté de la part de produit issu de ressources fossiles (le méthanol), brûlant dans le produit. La combustion de la part d'huile dans l'EMHV ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre (carbone biomasse).

Ainsi, la combustion de l'EMHV correspond à un bilan total en gaz à effet de serre de 888 g eq. CO₂ par kg d'EMHV, ou encore de 23,7 g eq. CO₂ par MJ d'EMHV.

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

		EMHV Colza
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	23.7
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	888
Contribution effet de serre émissions CO2	%	67.9%

19.2 Filière tournesol

19.2.1 Huile de tournesol

Indicateurs énergétiques :

Près de 5,5 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'huile de tournesol.

Cette performance énergétique peut se traduire comme une production nette (énergie restituée – énergie non renouvelable mobilisée) de 6,9 MJ par m² de surface cultivée en tournesol.

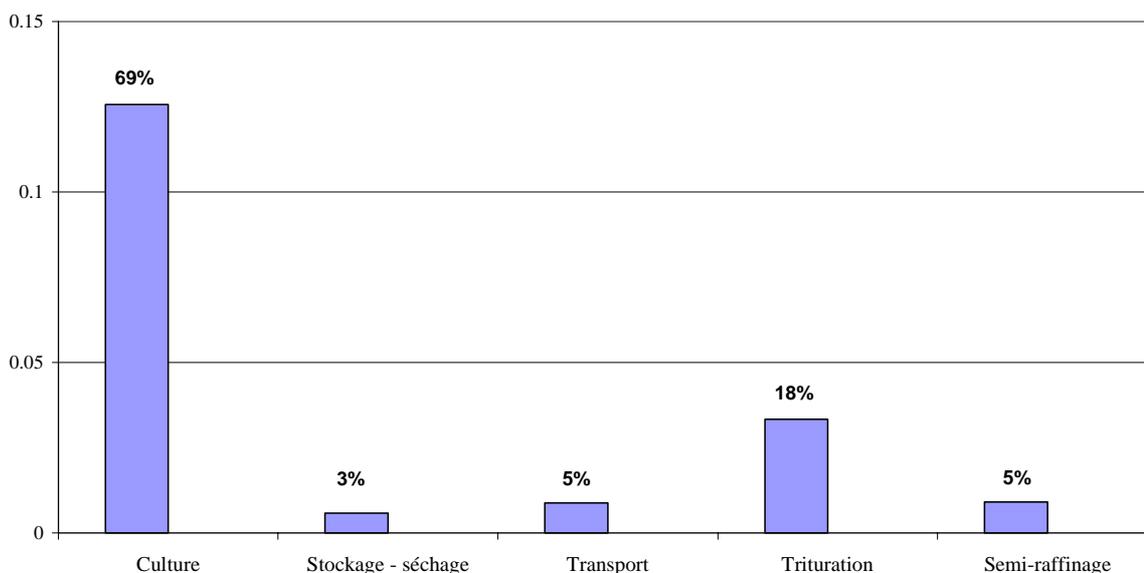
		Huile Tournesol
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0.183
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	6.88
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		5.48
Performance énergétique par surface		MJ/m ² 6.91

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- près de 70% pour l'étape de culture ;
- près de 20% pour l'étape de trituration.

Notons que l'étape de distribution finale n'a pas été prise en compte dans le bilan puisque la filière huile végétale ne possède pas encore d'étape de distribution de ses produits.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'huile



Indicateurs gaz à effet de serre :

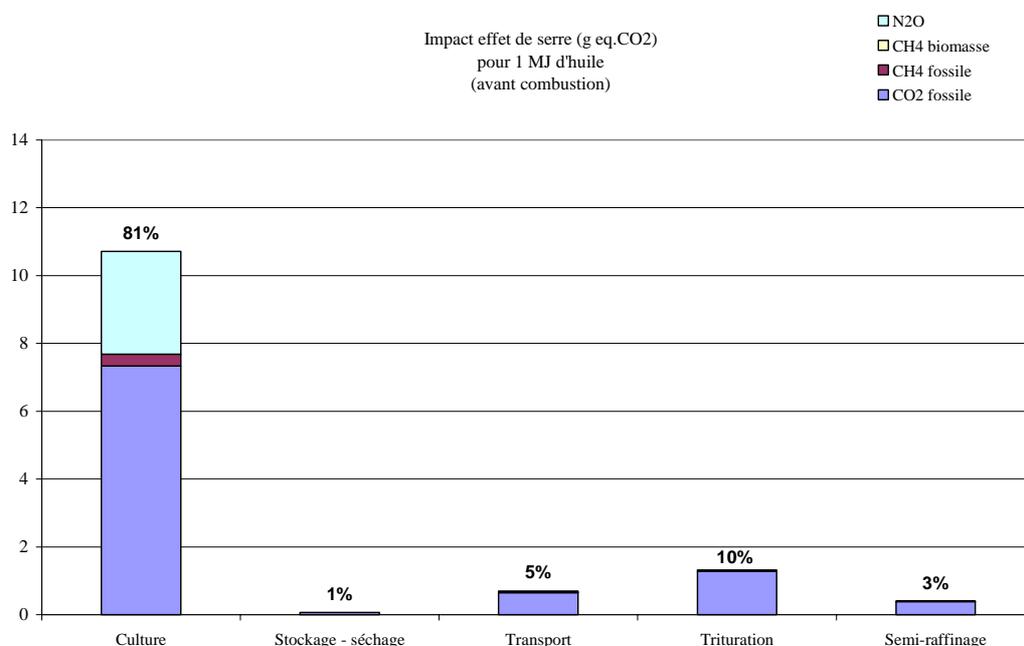
Les émissions de gaz à effet de serre sont de près de 500 g eq. CO₂ par kg d'huile de tournesol produite, ou encore de 13 g eq. CO₂ par MJ d'huile de tournesol produite.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à près de 74% aux émissions de CO₂, et à près de 23% aux émissions de N₂O provenant de la culture de tournesol.

Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	13.2
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	498
Contribution effet de serre émissions CO2	%	73.7%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	23.1%

L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à plus de 80% à la culture du tournesol ;
- à 10% à l'étape de trituration.



Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'huile de tournesol, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est identique à celui avant combustion du produit : en effet, tout le carbone contenu dans l'huile qui est brûlée correspond à du carbone biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre.

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

Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	13.2
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	498
Contribution effet de serre émissions CO2	%	73.7%

19.2.2 EMHV de tournesol

Indicateurs énergétiques :

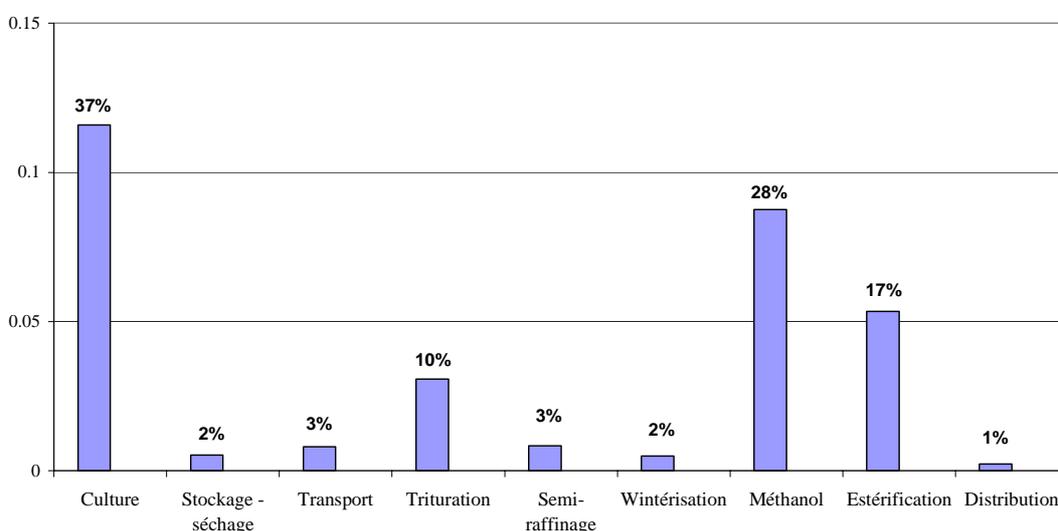
Près de 3,2 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'EMHV de tournesol.

		EMHV Tournesol
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0.316
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	11.7
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		3.16

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- 37% pour l'étape de culture ;
- 28% pour la fabrication du méthanol intégré dans l'EMHV ;
- 17% pour l'étape d'estérification (synthèse de l'EMHV à partir d'huile et d'EMHV) ;
- 10% pour l'étape de trituration.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'EMHV



Indicateurs gaz à effet de serre :

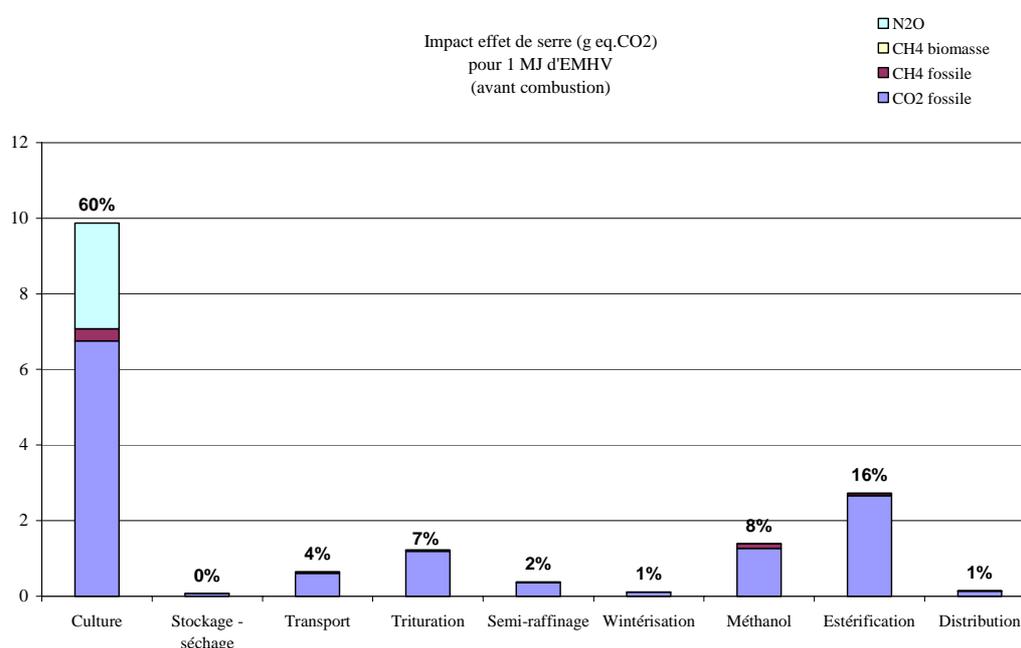
Les émissions de gaz à effet de serre sont de plus de 600 g eq. CO₂ par kg d'EMHV de tournesol produit, ou encore de 16,5 g eq. CO₂ par MJ d'EMHV de tournesol produit.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à près de 80% aux émissions de CO₂, et à près de 17% aux émissions de N₂O liées à la culture de tournesol.

Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	16.5
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	612
Contribution effet de serre émissions CO2	%	79.4%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	17.1%

L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à 60% à la culture du tournesol ;
- à 16% à l'étape d'estérification ;
- à hauteur de 7 ou 8 % pour les étapes de production du méthanol ou de trituration.



Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'EMHV de tournesol, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre se voit augmenté de la part de produit issu de ressources fossiles (le méthanol), brûlant dans le produit. La combustion de la part d'huile dans l'EMHV ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre (carbone biomasse).

Ainsi, la combustion de l'EMHV correspond à un bilan total en gaz à effet de serre de près de 880 g eq. CO₂ par kg d'EMHV, ou encore de 23,7 g eq. CO₂ par MJ d'EMHV.

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

		EMHV Tournesol
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	20.1
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	745
Contribution effet de serre émissions CO2	%	83.0%

19.3 Filière blé

19.3.1 Ethanol de blé

Indicateurs énergétiques :

Près de 2 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'éthanol de blé.

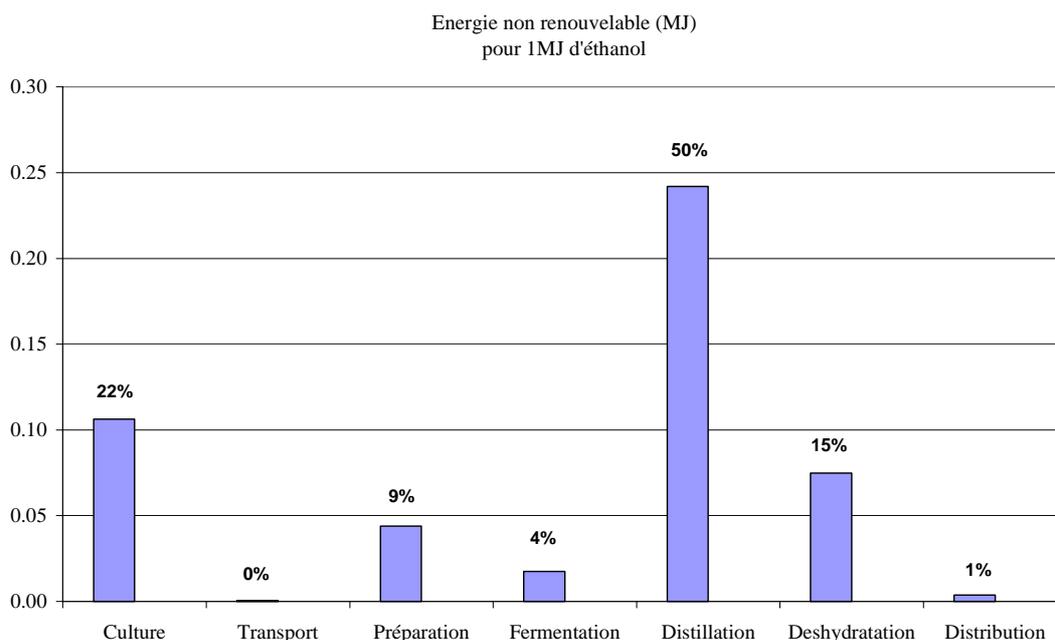
Cette performance énergétique peut se traduire comme une production nette (énergie restituée – énergie non renouvelable mobilisée) de 8,1 MJ par m² de surface cultivée en blé.

		Ethanol Blé
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0.489
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	13.1
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		2.05
Performance énergétique par surface	MJ/m ²	8.1

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- 50% à l'étape de distillation, fortement consommatrice de vapeur ;
- 22% à l'étape de culture du blé, dont 60% en liaison avec la synthèse des engrais azotés et 30% en liaison avec la mécanisation ;
- 15% à l'étape de déshydratation de l'éthanol.

Notons que les étapes de transport (approvisionnement en graines et distribution du produit final) contribuent très peu au bilan énergétique global de la filière (1%).



Indicateurs gaz à effet de serre :

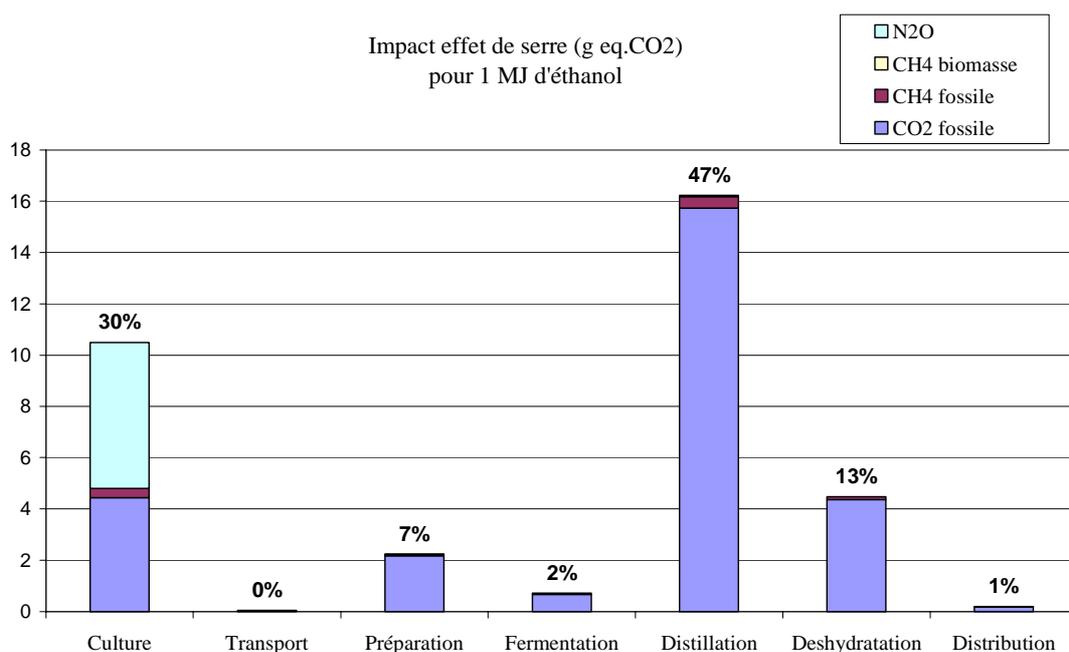
Les émissions de gaz à effet de serre sont d'environ 920 g eq. CO₂ par kg d'éthanol de blé produit, ou encore de 34,4 g eq. CO₂ par MJ d'éthanol produit.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 80% aux émissions de CO₂, et à près de 17% aux émissions de N₂O liées à l'étape de culture.

		Ethanol Blé
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO ₂ /MJ	34.4
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO ₂ /kg	922
Contribution effet de serre émissions CO ₂	%	80.2%
Contribution effet de serre émissions N ₂ O	%	16.7%

L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à près de 47% à l'étape de distillation ;
- à 30% à l'étape de culture.



Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'éthanol de blé, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est identique à celui avant combustion du produit : en effet, tout le carbone de l'éthanol qui est brûlé correspond à du carbone biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre.

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

		Ethanol Blé
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO ₂ /MJ	34.4
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO ₂ /kg	922
Contribution effet de serre émissions CO ₂	%	80.2%

19.3.2 ETBE de blé

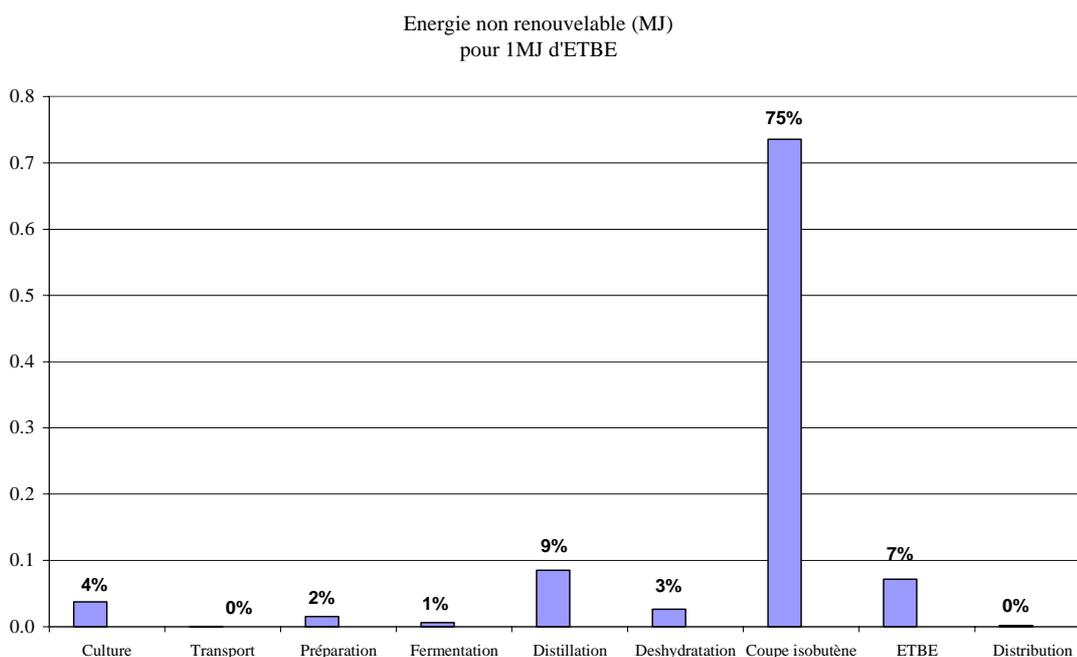
Indicateurs énergétiques :

Près de 1 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'ETBE de blé.

		ETBE Blé
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0.979
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	35.1
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		1.02

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- à près de 75% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- à 9% à l'étape de distillation ;
- à 7% à l'étape de synthèse de l'ETBE.



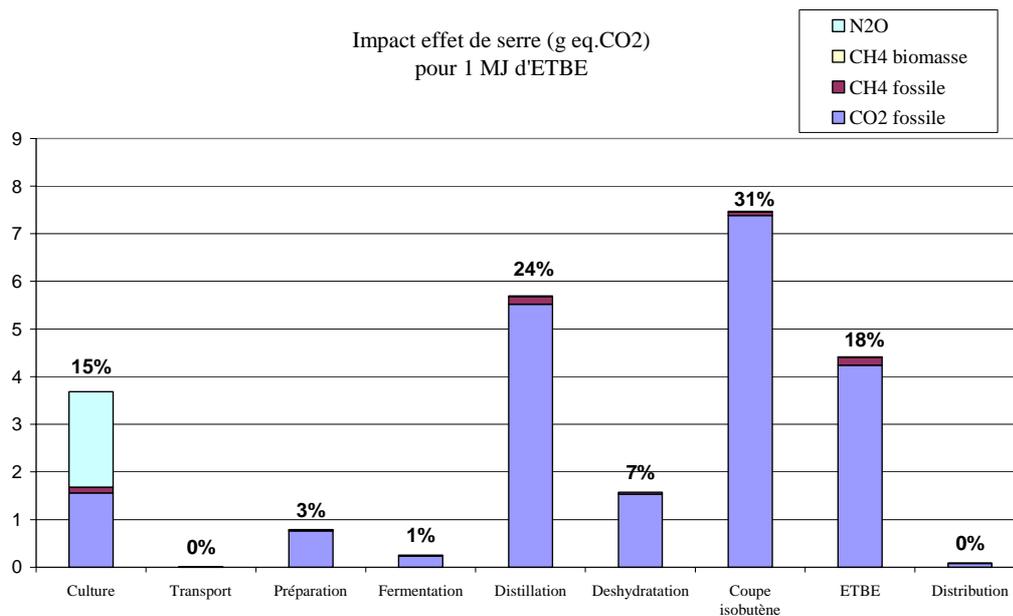
Notons que les étapes de transport (approvisionnement et distribution) contribuent très faiblement au bilan global gaz à effet de serre de la filière (moins de 1%).

Indicateurs gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 860 g eq. CO₂ par kg d'ETBE de blé produit, ou encore de 24 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE produit.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 89% aux émissions de CO₂, et à près de 9% aux émissions de N₂O liées à l'étape de culture.

		ETBE Blé
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	24.0
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	860
Contribution effet de serre émissions CO2	%	89.0%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	8.50%



L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à 31% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- à 24% à l'étape de distillation ;
- à 18% à l'étape de synthèse de l'ETBE ;
- à 17% à l'étape de culture.

Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'ETBE de blé, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre se voit augmenté de la part de produit issu de ressources fossiles (la coupe isobutène), brûlant dans le produit. La combustion de la part d'éthanol dans l'ETBE ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre (carbone biomasse).

Ainsi, la combustion de l'ETBE correspond à un bilan total en gaz à effet de serre de 2530 g eq. CO₂ par kg d'ETBE, ou encore de 70,5 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE.

<i>Avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur teneur en carbone</i>		ETBE Blé
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	70.5
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	2 531
Contribution effet de serre émissions CO2	%	96.3%

19.4 Filière betterave

19.4.1 Ethanol de betterave

Indicateurs énergétiques :

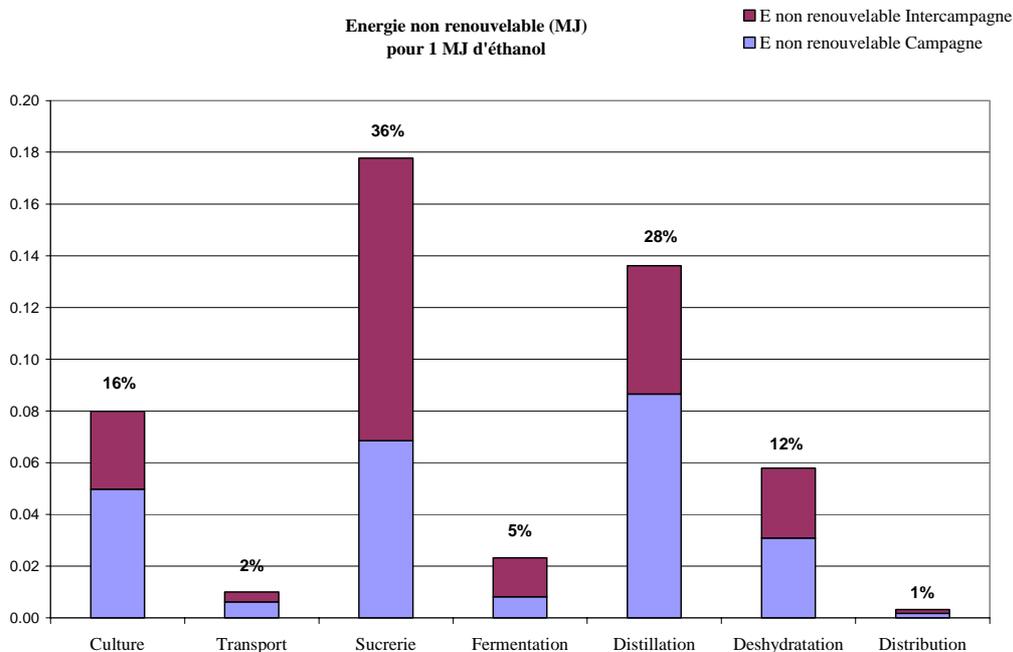
Près de 2,1 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'éthanol de betterave.

Cette performance énergétique peut se traduire comme une production nette (énergie restituée – énergie non renouvelable mobilisée) de près de 10,8 par m² de surface cultivée en betterave.

		Ethanol Betterave
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0.488
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	13.1
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		2.05
Performance énergétique par surface	MJ/m ²	10.83

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- 36% à l'étape de synthèse des substrats en sucrerie, fortement consommatrice de vapeur ;
- 28% à l'étape de distillation ;
- 16% à l'étape de culture de la betterave, dont 30% en liaison avec la synthèse des engrais azotés et 44% en liaison avec la mécanisation.



Rappelons qu'il a été considéré que 55% de l'éthanol est produit en période de campagne betteravière donc à partir des substrats « sirop » et « égout » et que 45% de l'éthanol est produit en période d'intercampagne c'est à dire à partir de jus vert et d'une faible quantité d'égout pauvre.

Il apparaît que l'étape de synthèse des substrats issus de la sucrerie contribue fortement à la mobilisation de l'énergie, en particulier dans le cas de la synthèse de l'éthanol en période d'intercampagne. En effet, la synthèse des substrats « sirop » et « égout » nécessite une étape de d'évaporation et de concentration du jus fortement consommatrice en énergie sous forme de vapeur.

Notons que les étapes de transport (approvisionnement en betterave et distribution de l'éthanol) contribuent peu au bilan énergétique global de la filière (environ 3%).

Indicateurs gaz à effet de serre :

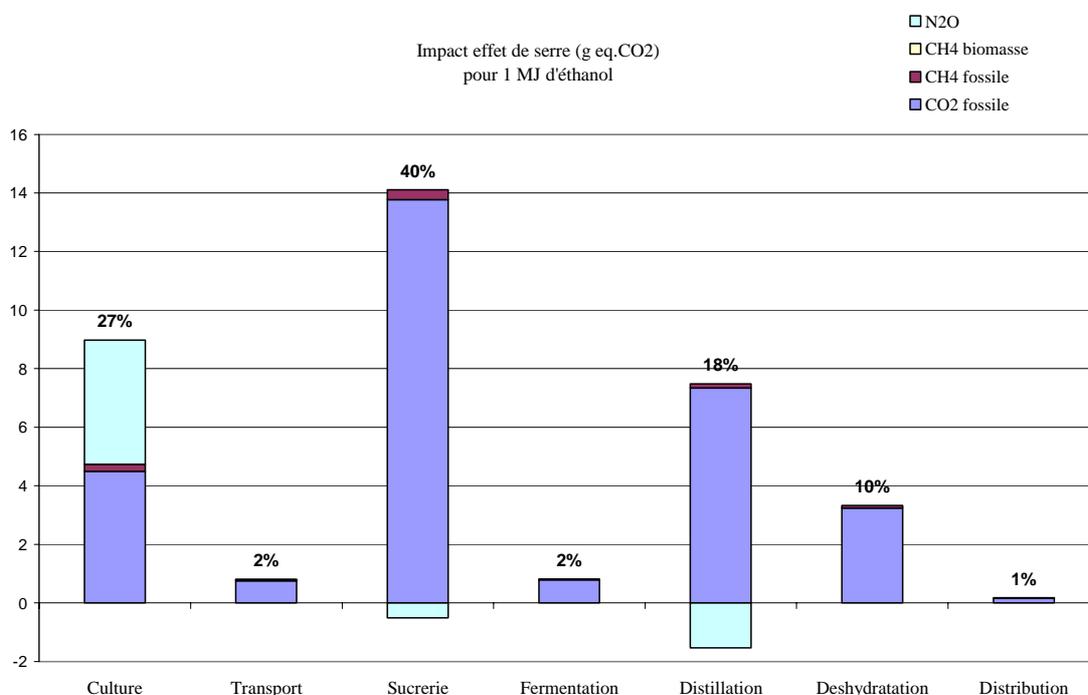
Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 900 g eq. CO₂ par kg d'éthanol de betterave produit, ou encore de 33,6 g eq. CO₂ par MJ d'éthanol produit.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 91% aux émissions de CO₂.

		Ethanol Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	33.6
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	902
Contribution effet de serre émissions CO2	%	90.8%
Contribution effet de serre émissions N2O	%	6.63%

L'impact sur l'effet de serre est principalement lié aux étapes suivantes :

- à 40% pour l'étape de synthèse des substrats issus de la sucrerie ;
- à 27% pour l'étape de culture de la betterave ;
- à 18% pour l'étape de distillation.



Notons que l'étape de distillation produit des vinasses destinées à l'épandage. La méthodologie adoptée pour prendre en compte ce co-produit valorisé a été de considérer que l'épandage des vinasses permet d'éviter l'usage d'engrais sous forme minérale (ammonitrate) donc d'éviter des consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre liées à la synthèse des engrais ainsi que les émissions de N₂O liées à l'application de ces engrais minéraux. Ceci explique pourquoi l'étape de distillation présente un indicateur d'impact sur l'effet de serre négatif.

Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'éthanol de betterave, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est identique à celui avant combustion du produit : en effet, tout le carbone de l'éthanol qui est brûlé correspond à du carbone biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre.

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

		Ethanol Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO ₂ /MJ	33.6
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO ₂ /kg	902
Contribution effet de serre émissions CO ₂	%	90.8%

19.4.2 ETBE de betterave

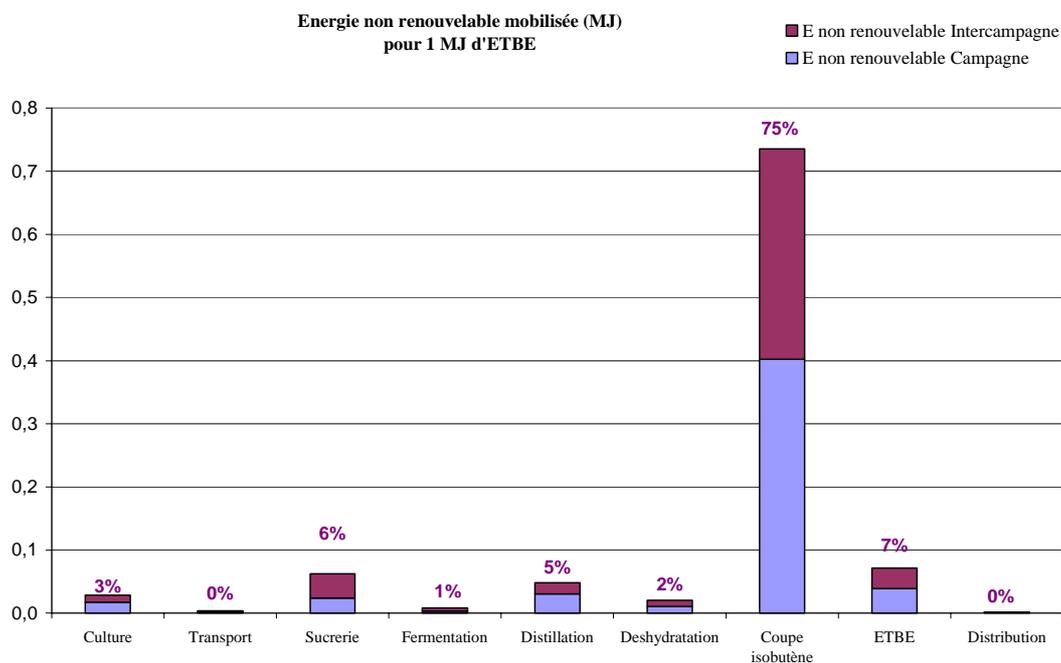
Indicateurs énergétiques :

Environ 1,02 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'ETBE de betterave.

		ETBE Betterave
Energie non renouvelable mobilisée par MJ	MJ/MJ	0,979
Energie non renouvelable mobilisée par kg	MJ/kg	35,1
Energie restituée / Energie non renouvelable mobilisée		1,022

La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- à près de 75% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- à 7% à l'étape de synthèse des de l'ETBE.
- à 6% à l'étape de synthèse des substrats issus de la sucrerie.



Indicateurs gaz à effet de serre :

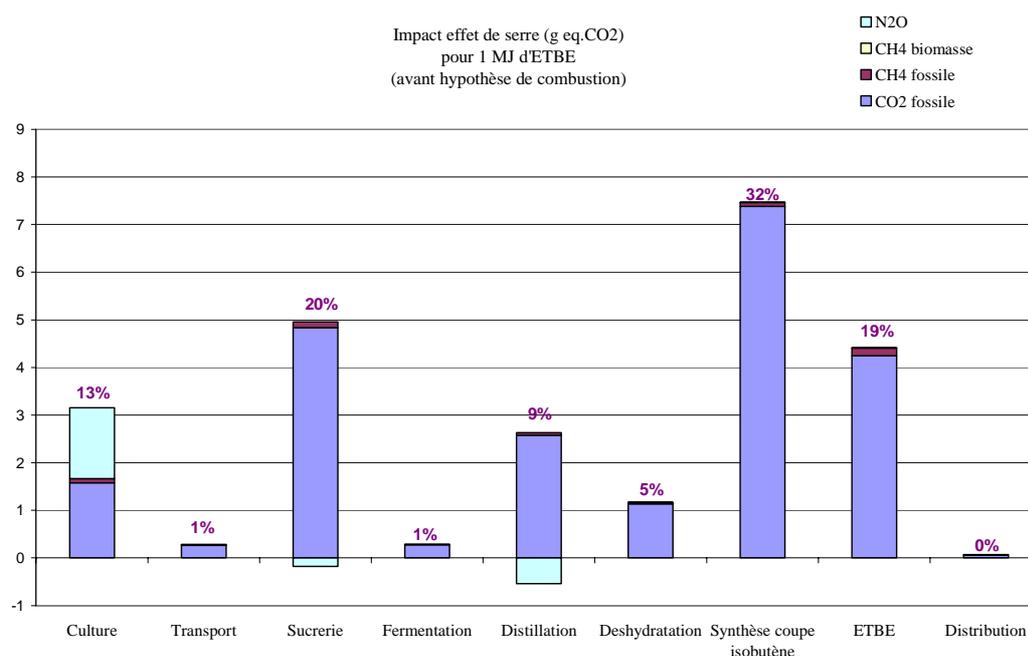
Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 850 g eq. CO₂ par kg d'ETBE de betterave produit, ou encore de 23,7 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE produit.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 94% aux émissions de CO₂. La contribution des émissions de N₂O est très faible puisque l'azote est appliqué sous forme organique (vinasses).

		ETBE Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO ₂ /MJ	23,7
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO ₂ /kg	851
Contribution effet de serre émissions CO ₂	%	94,3%
Contribution effet de serre émissions N ₂ O	%	3,38%

L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à 32% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- à 20% à l'étape de synthèse des substrats issus de la sucrerie, utilisés en distillerie ;
- à 19% à l'étape synthèse de l'ETBE.
- à 13% à l'étape de culture ;



Les valeurs négatives de l'impact sur l'effet de serre lié aux émissions de N₂O pour les étapes de sucrerie et distillation s'expliquent de la même façon que pour la filière éthanol (cf. paragraphe 19.4.1).

Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'ETBE de betterave, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre se voit augmenté de la part de produit issu de ressources fossiles (la coupe isobutène), brûlant dans le produit. La combustion de la part d'éthanol dans l'ETBE ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre (carbone biomasse).

Ainsi, la combustion de l'ETBE correspond à un bilan total en gaz à effet de serre d'environ 2522 g eq. CO₂ par kg d'ETBE, ou encore de 70,3 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE.

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

		ETBE Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	70,3
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	2 522
Contribution effet de serre émissions CO2	%	98,1%

20 SYNTHÈSE DES RESULTATS POUR LES CAS DE REFERENCE

20.1 Bilans énergétiques

		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	1,022
Performance énergétique par surface	MJ/m ²		8,12	10,83			

		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
Performance énergétique par surface	MJ/m ²		8.98	6.91		

20.2 Bilans gaz à effet de serre avant hypothèse de combustion

		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

20.3 Bilans gaz à effet de serre avec hypothèse de combustion totale

Avec hypothèse de combustion totale des produits, effectuée sur la base de leur 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	3 653	922	902	3 131	2 531	2 522

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
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	3 394	660	498	888	745

On remarquera que dans l'hypothèse de combustion totale 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).

SECTION V

Tests de paramètres et scénarios prospectifs

Différentes simulations ont fait l'objet de l'étude menée par l'ADEME et la DIREM.

L'objectif des simulations est :

- soit d'effectuer des tests sur certains paramètres pour lesquels les hypothèses ont été émises pour le calcul du bilan pour les scénarios de référence ; ces tests permettent ainsi d'évaluer la plage de validité des conclusions ;
- soit de tester des options prospectives et de réaliser une nouvelle évaluation des bilans dans la perspective de développement de chacune des filières dans les prochaines années, s'accompagnant de nouvelles installations de production et d'éventuelles innovations technologiques.

Les résultats détaillés sont présentés en Annexe V pour les tests de paramètres et en Annexe VI pour les scénarios prospectifs des différentes filières.

21 TESTS DE PARAMETRES

21.1 Prise en compte de l'énergie d'amortissement des matériels agricoles

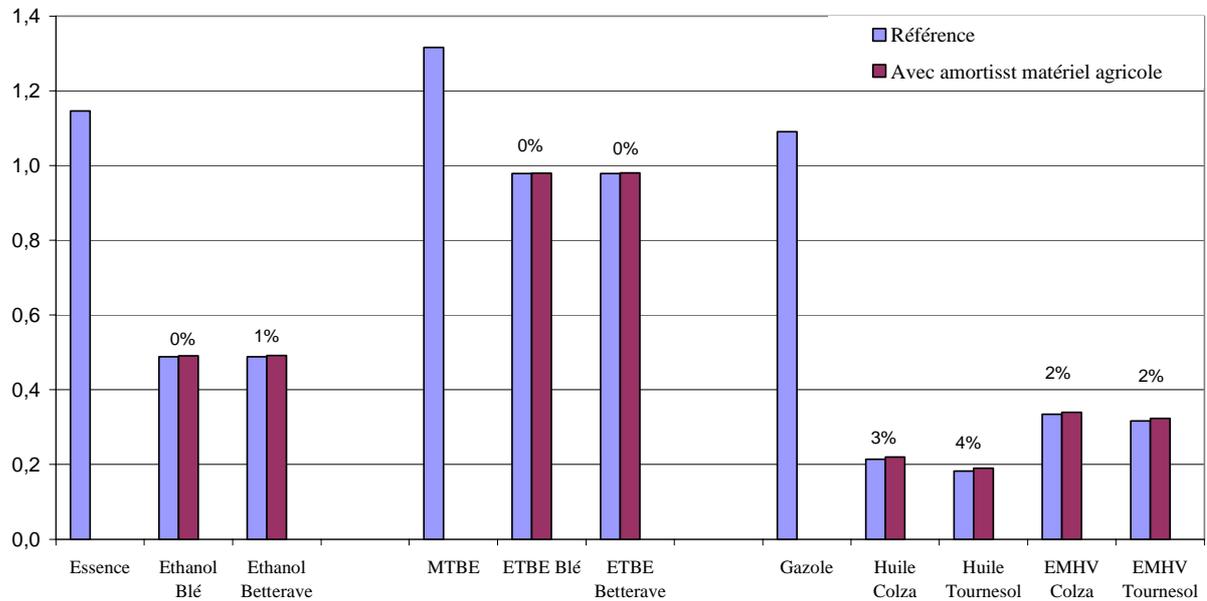
Dans le cas de référence, la prise en compte de l'étape de culture pour les biocarburants se fait en tenant compte des consommations énergétiques et émissions de gaz à effet de serre associées à la production d'engrais minéraux (N, P, K), de phytosanitaires, mais aussi à la consommation de carburant liés au passage d'outils (tracteur, outils tractés, moissonneuse...).

L'énergie liée à l'immobilisation des matériels agricoles, dite énergie d'amortissement (acier, fonte... constituant les machines, et qui sont amortis au nombre d'heure de durée de vie de chacune des machines) n'est pas prise en compte dans cette évaluation.

Conformément à ce que propose le "Référentiel pour les bilans énergétiques des cultures agricoles", il apparaît intéressant de quantifier cette énergie d'amortissement des matériels agricoles, de l'intégrer dans les bilans, et d'évaluer l'incidence de cette prise en compte dans les bilans des biocarburants.

Les résultats de cette simulation en matière de bilans énergétiques et gaz à effet de serre sont présentés dans les graphiques ci-dessous :

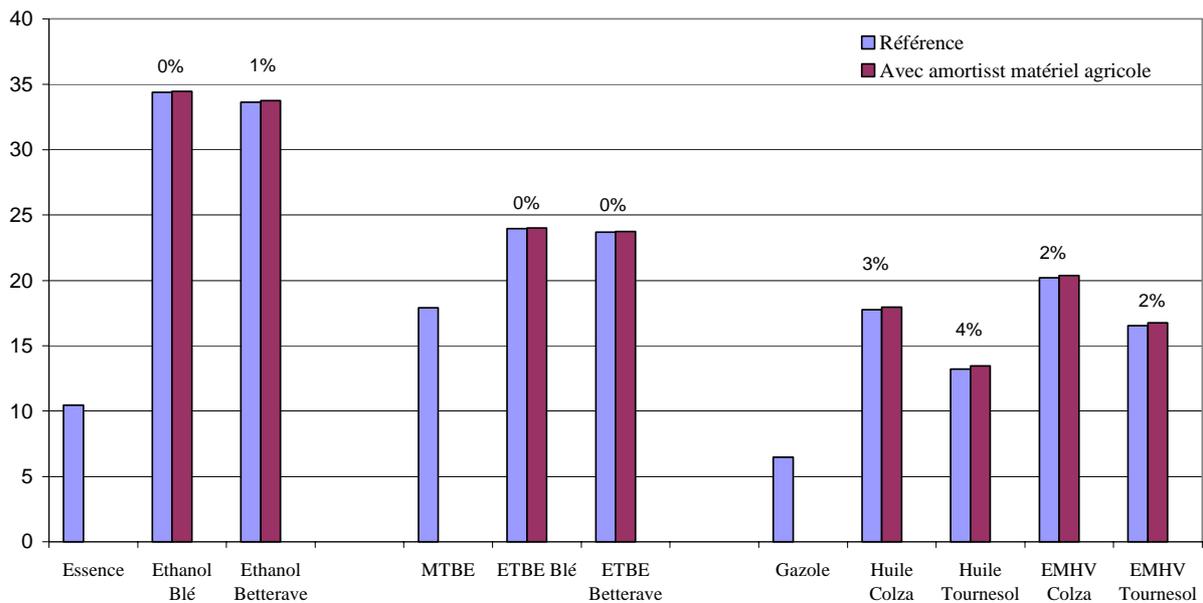
Energie non renouvelable mobilisée
en MJ par MJ de produit



Exemple de lecture :

Filière huile de colza : la prise en compte de l'énergie d'amortissement allourdit le bilan énergétique de 3%.

Impact sur l'effet de serre (g éq. CO₂)
par MJ de produit



Exemple de lecture :

Filière huile de colza : la prise en compte de l'énergie d'amortissement allourdit le bilan gaz à effet de serre de 3%.

La prise en compte de l'amortissement du matériel agricole a une influence négligeable sur les bilans globaux de l'énergie mobilisée et des émissions de gaz à effet de serre des filières de production de l'éthanol et d'ETBE de blé et betterave ainsi que sur les filières huiles et EMHV de colza et tournesol.

Il était donc justifié de négliger ce paramètre pour l'établissement des bilans dans le cas des scénarios de référence.

Les résultats chiffrés de ces simulations sont fournis pour l'ensemble des indicateurs suivis dans l'étude, en Annexe V.

21.2 Stockage de carbone dans les sols

Selon une expertise en cours de développement au sein de l'INRA, les cultures agricoles contribuent au stockage de carbone dans les sols, et donc à la lutte contre l'effet de serre au même titre que les forêts ou les prairies par exemple, davantage reconnues sur ce sujet.

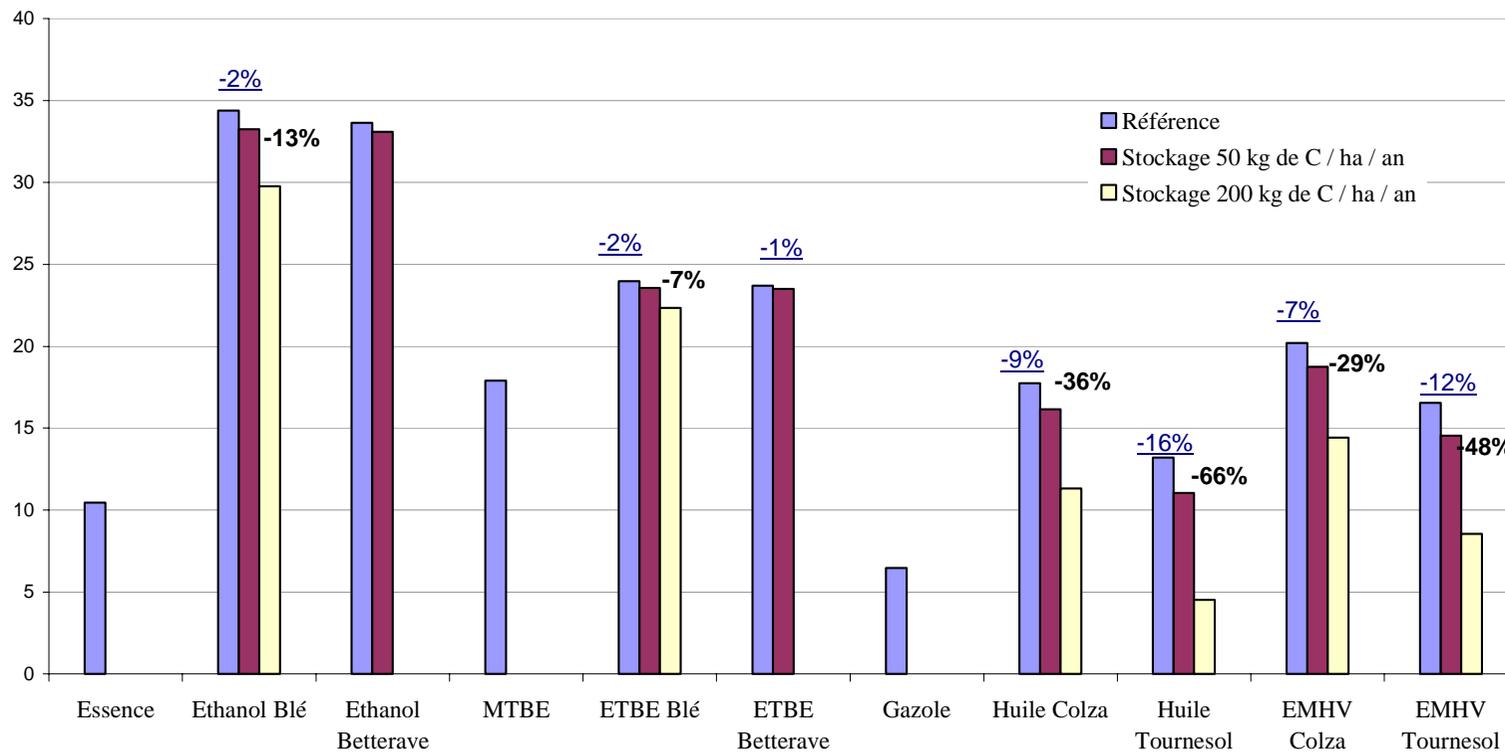
En l'absence de donnée publique récente validée sur le sujet, le cas de référence de l'étude ne tient pas compte de ce stockage de carbone lié aux cultures utilisées pour la production de biocarburants (voir paragraphe 7.3.2).

En revanche, ce stockage étant susceptible d'affecter le bilan des biocarburants, des simulations sont effectuées en tenant compte d'un stockage :

- de 50 kg de carbone par ha et par an pour les cultures de blé, betterave, colza et tournesol ;
- de 200 kg de carbone par ha et par an pour les cultures de blé, colza et tournesol. Le stockage de 200 kg de carbone par ha et par an sur la culture de betterave n'est pas réaliste.

Les résultats de cette simulation, sur l'indicateur gaz à effet de serre, avant et après combustion sont présentés ci-après.

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

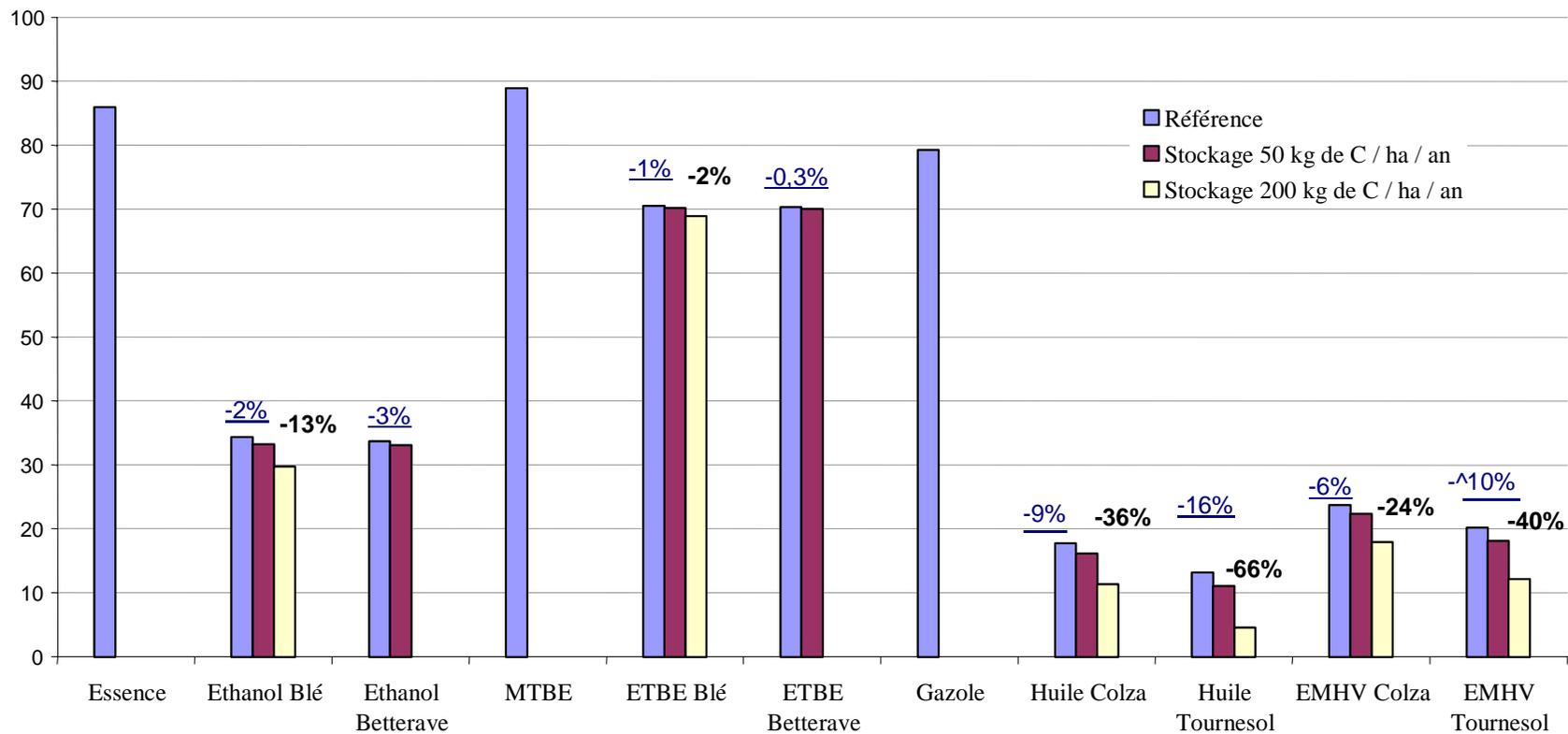


Légende : exemple pour l'éthanol de blé

-2% : sc stockage 50 kg C / réf

-13% : sc stockage 200kg / réf

**Impact sur l'effet de serre en g éq. CO2 par MJ de produit
(après combustion)**



Légende : exemple pour l'éthanol de blé

-2% : sc stockage 50 kg C / réf

-13% : sc stockage 200kg / réf

La prise en compte d'un stockage de 50 kg de carbone par ha et par an améliore sensiblement les bilans gaz à effet de serre avant combustion sur l'ensemble des filières.

La prise en compte d'un stockage de 200 kg de carbone par ha et par an améliore plus nettement le bilan gaz à effet de serre avant combustion des filières :

- éthanol de blé (diminution de 13% de l'impact sur l'effet de serre) ;
- EMHV de colza (diminution de 29% de l'impact sur l'effet de serre) ;
- Huile de colza (diminution de 36% de l'impact sur l'effet de serre) ;
- EMHV de tournesol (diminution de 48% de l'impact sur l'effet de serre) ;
- huile de tournesol (diminution de 66% de l'impact sur l'effet de serre).

La prise en compte de ce paramètre a un effet plus ou moins important selon la filière considérée : en effet cet indicateur est directement lié à la surface cultivée et la performance par unité de surface varie d'une filière à une autre (performance par unité de surface pour la filière tournesol assez faible par exemple).

Après combustion, ce gain est moins visible pour les filières ETBE de blé et betterave.

Les résultats chiffrés de ces simulations sont fournis pour l'ensemble des indicateurs suivis dans l'étude, en Annexe V.

21.3 Facteurs d'émissions pour le N₂O

Les émissions de N₂O liées à l'utilisation d'engrais azotés sur les parcelles agricoles sont susceptibles d'être très variables, en fonction des conditions climatiques, du sol, de la culture...

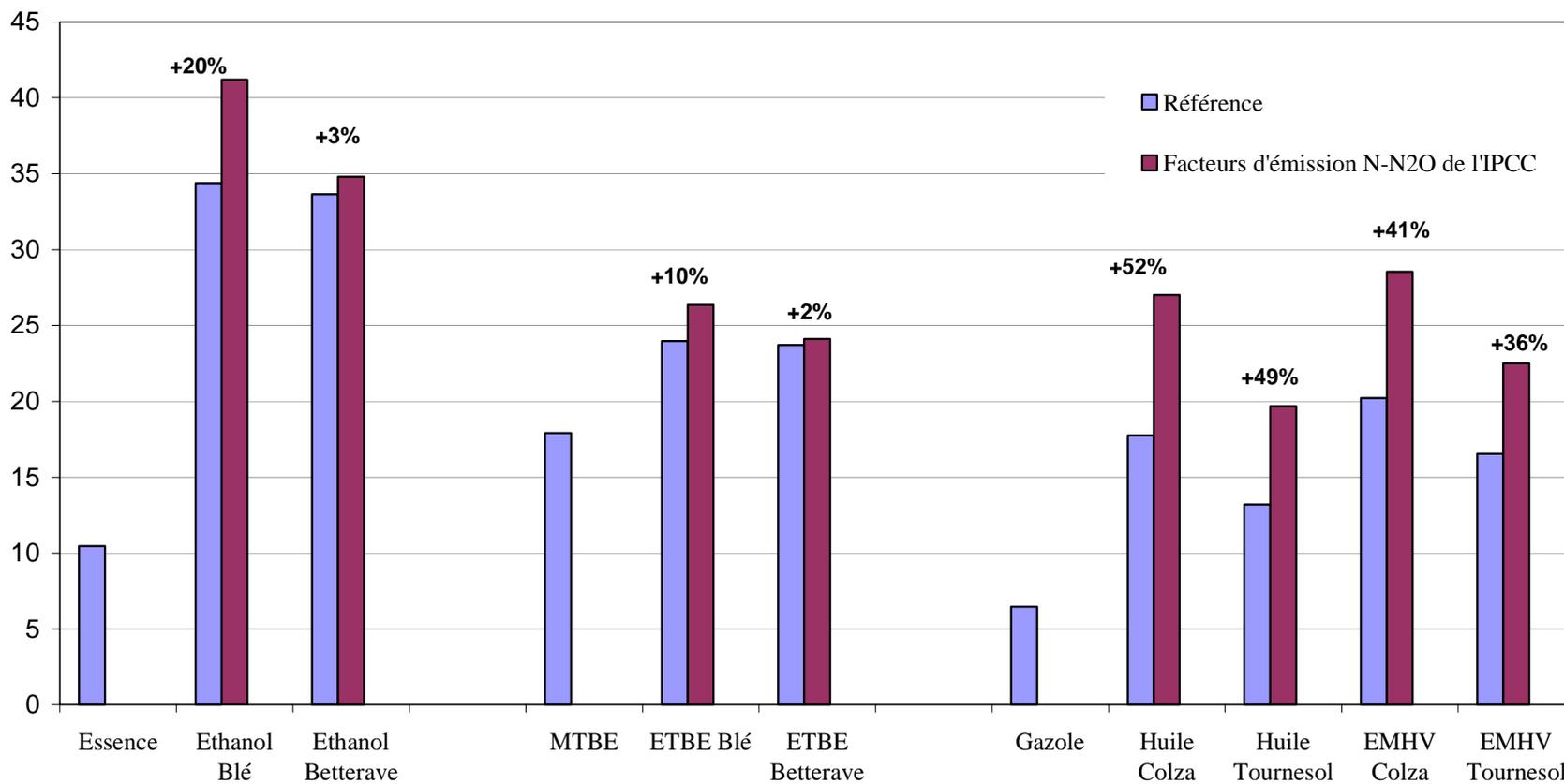
L'étude a cherché à identifier des facteurs d'émission aussi précis que possible pour chacune des cultures étudiées.

En l'absence de données récentes françaises validées pour l'ensemble des cultures étudiées, et après renseignement auprès d'experts français, dont M Germon de l'INRA de Dijon, il est apparu que deux séries de données intéressantes méritaient d'être étudiées (voir paragraphe 7.3.1) :

- celles proposées par SKIBA en 1996, correspondant à des données anglo-saxonnes, et qui proposent des facteurs d'émissions spécifiques pour chacune des cultures étudiées. Le principal inconvénient de ces résultats est qu'il repose sur un nombre très limité d'essais. **Ce sont ces facteurs qui ont été retenus dans le cas de référence de l'étude ;**
- celles proposées par l'IPCC, qui, même en constituant une approche globale, constituent la meilleure source actuelle de données publiques, travaillant sur un nombre significatif d'essais. **Ce sont ces facteurs d'émissions IPCC qui ont été étudiés dans le cadre simulations sur les résultats de l'étude.**

Les résultats de cette simulation, sur l'indicateur gaz à effet de serre, avant et après combustion des produits sont présentés ci-après.

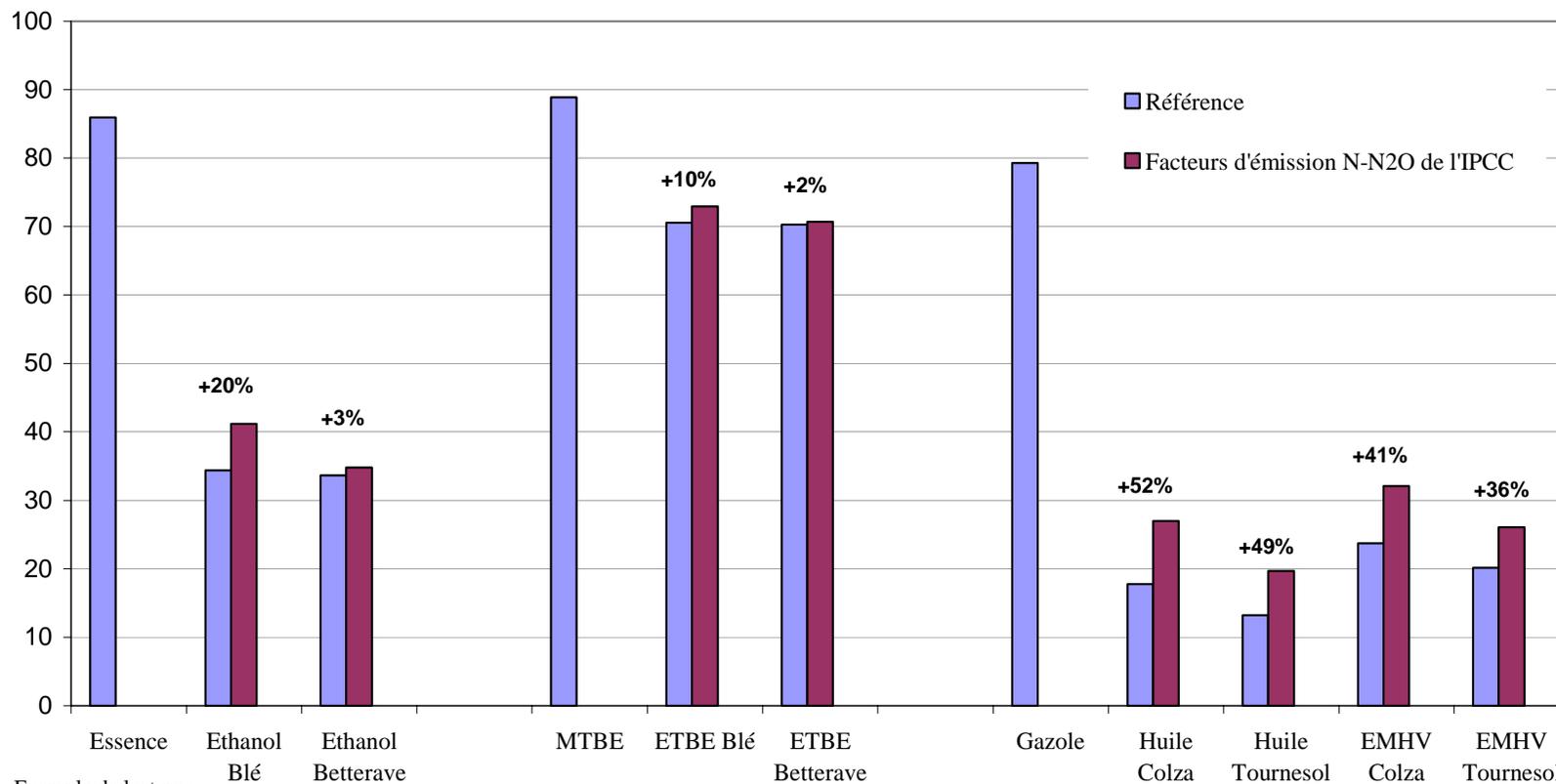
Impact sur l'effet de serre en g éq. CO2 par MJ de produit (avant combustion)



Exemple de lecture :

Filière éthanol de blé : la prise en compte des facteurs d'émissions IPCC augmentent le bilan gaz à effet de serre (avant combustion) de 20% par rapport au scénario de référence (qui utilise les facteurs de SKIBA)

**Impact sur l'effet de serre en g éq. CO2 par MJ de produit
(après combustion)**



Exemple de lecture :

Filière éthanol de blé : la prise en compte des facteurs d'émissions IPCC augmentent le bilan gaz à effet de serre (après combustion) de 20% par rapport au scénario de référence (qui utilise les facteurs de SKIBA)

La prise en compte des coefficients IPCC pour les émissions de N-N₂O à l'échelle de la parcelle plutôt que les coefficients de SKIBA a une influence non négligeable sur le bilan global des émissions de gaz à effet de serre de l'ensemble des filières biocarburants :

- Filière huile de colza et tournesol : augmentation d'environ 50% des émissions ;
- Filière EMHV de colza et tournesol : augmentation d'environ 40% des émissions ;
- Filière éthanol de blé : augmentation environ 20% des émissions ;
- Filière ETBE de blé : augmentation environ 10% des émissions.

Pour la filière betterave, les émissions considérées dans le scénario de référence sont plus proches de celles préconisées par l'IPCC ce qui explique que l'évolution du bilan gaz à effet de serre est moins importante que sur les autres filières.

Après combustion, l'impact de ce paramètre est moins visible pour les filières ETBE de blé et EMHV de colza et tournesol.

Les résultats chiffrés de ces simulations sont fournis pour l'ensemble des indicateurs suivis dans l'étude, en Annexe V.

22 DESCRIPTION DES SCENARIOS PROSPECTIFS RETENUS POUR LES SIMULATIONS

22.1 Essence et gazole

L'étude de scénarios prospectifs des filières de production d'essence et de gazole à l'échéance 2009 tient compte :

- de l'évolution de la teneur en soufre des produits, à 10 ppm, pour l'essence comme pour le gazole ;
- de l'évolution des niveaux de production et d'incorporation d'ETBE et d'EMHV respectivement à l'essence et au gazole à l'échéance 2009 ;
- des scénarios d'évolution de la demande en 2009 ;
- de l'évolution du niveau des importations nettes.

Etant donné les hypothèses d'évolution de la demande en produits pétroliers et les limitations d'accroissement de capacité de certaines unités (0 Mt pour l'hydrocraquage et 2,5 Mt pour l'hydrocraquage doux) à l'horizon 2009, les investissements supplémentaires requis dans les raffineries françaises par rapport à 2005 portent sur : l'hydrocraquage doux (2,5 Mt supplémentaires), l'hydrodésulfuration poussée (5 Mt supplémentaires), le vaporeformage (156 MMscfd (million of standard cubic feet per day) d'hydrogène supplémentaires) et les unités de purification d'essences lourdes de FCC (principal contributeur de la teneur en soufre des essences ; 1 Mt supplémentaires).

En outre, il est supposé que 10 Mt de capacité d'hydrotraitement moyenne pression (ayant un taux d'hydrodésulfuration d'environ 97-98%) de distillats moyens ont été revampées (en unité haute pression et/ou en modifiant le catalyseur utilisé) pour atteindre des performances en hydrodésulfuration de l'ordre de 99%.

Les modifications requises pour 2009 issues de la modélisation semblent compatibles avec le schéma de raffinage français actuel. Néanmoins, dans les conditions évoquées précédemment et dans les limitations liées à toute modélisation, il convient de remarquer que les importations de distillats moyens (hors jet fuel) s'élèvent à 14 Mt en 2009 (plus 3Mt liées au calage du modèle) et que les émissions de CO₂ liées à ces importations ne sont pas prises en compte dans les chiffres suivants.

En ce qui concerne le commerce extérieur des autres produits, on peut noter que la quantité d'essences exportées est de 4,1 Mt et celle de fuel lourd de 3 Mt.

Les émissions totales de CO₂ du raffinage français s'élèvent ainsi à l'optimum à 17,2Mt en 2009, soit une hausse de 3,2 Mt par rapport à 2000 et de 1,3 Mt par rapport à 2005 à iso-efficacité énergétique.

A partir des résultats obtenus à l'optimum, les bilans énergétiques et effet de serre des deux carburants étudiés peuvent être établis selon la méthode décrite précédemment.

Carburants	MJ / tonne	g.CO ₂ / MJ	MJ / MJ *	g.CH ₄ / MJ	g.N ₂ O / MJ
Gazole	42700	4,58	0,039	0,00004	0,00003
Essence	42600	6,59	0,08	0,00004	0,00003

* consommation énergétique par MJ de carburant

Tableau 14 : Bilans énergétiques et effet de serre 2009

Par rapport aux résultats 2005, on constate une hausse des émissions de CO₂ par MJ de gazole produit de 1,22 g de CO₂ et une très légère baisse de celles de l'essence (-0,17 g de CO₂). 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. Ces variations sont directement liées aux hypothèses formulées et à la nature de l'investissement requis dans la modélisation. En ce qui concerne les essences les effets aux renforcements des spécifications sont contre-balançés par une demande en baisse et une composition différentes des essences.

Les émissions de CH₄ et de N₂O demeurent marginales.

En ce qui concerne le CO₂, ces chiffres correspondent également à 0,19 tonne de CO₂ émis par tonne de gazole produit (soit 0,05 tonne de CO₂ de plus qu'en 2005) et à 0,29 tonne de CO₂ émis par tonne d'essence produite (soit 0,01 tonne de CO₂ de moins qu'en 2005).

Enfin, nous suggérons pour le contenu en CO₂ du gazole importé de retenir les mêmes valeurs que celles obtenues dans le cadre du raffinage français et mentionnées dans le tableau 14. Cette hypothèse doit être considérée avec précaution dans la mesure où une étude de sensibilité à partir du raffinage français montre une variation possible comprise entre 0,10 et 0,45 tonne de CO₂ par tonne de gazole (soit respectivement 2,31 et 10,39 grammes de CO₂ par MJ de gazole) selon le mode de production du gazole importé (respectivement gazole de distillation atmosphérique hydrotraité et gazole d'hydrocraquage catalytique).

22.2 Filières colza et tournesol

Les variantes prospectives pour le colza et le tournesol portent sur :

- **l'étape de culture** du colza ou du tournesol, pour laquelle on considère des données d'itinéraires techniques attendues dans les prochaines années, à l'échéance 2009 ;
- **l'étape d'estérification**, pour laquelle deux variantes sont étudiées :
 - l'estérification selon le procédé utilisé sur le site de Compiègne ;
 - l'estérification selon le procédé de catalyse hétérogène, non mis en place de façon opérationnelle aujourd'hui, mais issu de données en cours d'étude avec l'IFP.

Les étapes de trituration et de semi-raffinage (et Wintérisation pour le tournesol) restent inchangées, en dehors du fait que dans le cas "Compiègne" comme dans le cas "Catalyse hétérogène", il n'y a pas d'épandage de boues, et donc pas d'impacts évités en apport d'engrais minéraux N, P, K permis aux étapes de trituration et semi-raffinage pour ces simulations.

22.2.1 Variantes prospectives de culture du colza et du tournesol

Le rendement des cultures à l'échéance 2009 est évalué en tenant compte de la courbe de tendance de l'évolution du rendement depuis 1955 pour le colza et 1970 pour le tournesol.

Il est de 36,4 q/ha pour le colza en 2009 (contre 33,4 q/ha dans le cas de référence), et de 25,9 q pour le tournesol en 2009 (contre 24,4 q/ha dans le cas de référence).

La part de labour et de non labour varie :

- pour le colza 35% labour, 65% non labour, contre 65% labour et 35% non labour dans le cas de référence ;
- pour le tournesol 70% labour et 30% non labour contre 85% labour et 15 % non labour dans le cas de référence.

Cette évolution de la part de labour et de non labour se justifie de plusieurs façons : d'une part l'agrandissement de la taille des exploitations sans augmentation de la main d'œuvre disponible va contraindre les agriculteurs à réduire leur temps de travail à l'hectare d'où une progression du travail sans labour. D'autre part, la Recherche et le Développement permet de mieux maîtriser ces techniques de travail sans labour, ce qui conduit à les développer. Enfin, les contraintes environnementales et les attentes de la société en matière d'environnement devraient contribuer à développer le travail sans labour qui permet d'accroître la fertilité des sols, de limiter l'érosion, d'économiser de l'énergie.

De plus, pour le colza comme pour le tournesol, l'itinéraire technique reste inchangé (en dehors des passages d'outils et des applications de phytosanitaires adaptés à l'évolution de la part de non labour), du fait de plusieurs phénomènes attendus dans les prochaines années :

- optimisation de la fertilisation (meilleur ajustement Apports/Besoins des plantes) ;
- optimisation des traitements phytosanitaires (meilleure connaissance des maladies) ;
- variétés plus efficaces pour l'utilisation de l'azote (progrès génétique) ;
- progrès génétique en terme de résistances aux maladies (donc pas plus de produits phytosanitaires).

22.2.2 Evolutions attendues dans la phase industrielle de production des huiles et EMHV de colza et tournesol

Comme cela a déjà été indiqué, les procédés de trituration et de semi-raffinage des graines de colza ou tournesol en huile correspondent à des procédés relativement standards, quel que soit le site de trituration.

En revanche, l'étape d'estérification est susceptible de présenter d'importantes variations entre les sites.

Si les prochaines années voient la demande en EMHV augmenter, une nouvelle unité de production devrait voir le jour, car les unités existantes sont proches de leur limite de capacité. Cependant, les spécialistes de la filière ne se prononcent pas sur le type de procédé qui pourrait être utilisé dans cette nouvelle unité.

Plusieurs possibilités sont ouvertes :

- l'estérification type "Grand Couronne" (retenue dans le cas de référence de l'étude). Ce procédé purifie l'ester par distillation. Il présente l'avantage de fonctionner en continu, et de produire une glycérine à meilleure teneur en glycérol. Cependant, ce procédé est très gourmand en énergie ;
- l'estérification type "Compiègne". Ce procédé, plus ancien purifie l'ester par lavage. La glycérine est plus pauvre en glycérol, mais le procédé est moins gourmand en énergie ;
- le procédé de transestérification par catalyse hétérogène, en cours de développement avec l'IFP. Ce procédé semble cependant très gourmand en énergie.

Aujourd'hui, le développement d'une nouvelle unité s'effectuerait sans doute en mettant en place une unité de cogénération (comme à Grand Couronne), mais en utilisant un procédé d'estérification par lavage, comme à Compiègne, qu'il est désormais technologiquement possible de faire fonctionner en continu. Le procédé de transestérification par catalyse hétérogène est également à l'étude. C'est pourquoi ces deux technologies ont été retenues à l'étude dans les simulations prospectives.

22.2.2.1 Procédé industriel d'estérification de type "Compiègne"

Ce procédé purifie l'ester par lavage. La glycérine produite est plus pauvre en glycérol, mais au total, la quantité de glycérol produite par unité d'EMHV est identique entre Compiègne et Grand Couronne. Le rendement diester/huile est meilleur sur le site de Compiègne par rapport à Grand Couronne (moins de résidus de distillation). La quantité d'énergie consommée est moindre avec ce procédé.

22.2.2.2 Procédé industriel d'estérification par "catalyse hétérogène (procédé IFP)"

Ce procédé permet de produire une glycérine très pure. Le rendement de production diester/huile est supérieur à 100%. Certains consommables du procédé sont supprimés, en revanche, un nouveau catalyseur est utilisé. En l'absence de données sur ce catalyseur, il n'a pu être pris en compte dans la modélisation de cette simulation. Ce procédé s'avère gourmand en consommations énergétiques.

22.2.3 Transports dans le scénario prospectif

Aucune modification des distances de transport n'est intervenue dans le scénario prospectif, en comparaison avec le scénario de référence.

22.3 Filière blé

Les variantes prospectives pour la filière blé portent sur :

- **l'étape de culture** du blé, pour laquelle on considère des données d'itinéraires techniques attendues dans les prochaines années, à l'échéance 2009 ;
- **l'étape de transformation industrielle**, pour laquelle il est prévu un certain nombre de changements en terme de capacité et sources d'énergie utilisées dans les procédés.

22.3.1 Variante prospective de l'étape de culture du blé : évolution attendues à l'horizon 2009

Des évolutions de rendement sont attendues sur la culture de blé : en effet, on observe depuis 50 ans, une évolution des rendements de l'ordre de 1,1 quintal par an, principalement lié à la sélection génétique. Le rendement pris en compte pour le scénario de référence correspondant à l'année 2001 était de 90 qt/ha. Ainsi, à l'horizon 2009, le rendement estimé par l'ITCF est de 98 qt/ha.

Ces évolutions du rendement, liées au progrès génétique, n'induiront pas d'augmentation d'apports d'engrais azotés.

Il est également attendu que la proportion des surfaces cultivée en non labour évolue : le scénario prospectif prévoit que 37% des surfaces, en moyenne sur les trois régions considérées, seront cultivées sans labour.

Le pourcentage de pailles récoltées à l'horizon 2009 est estimé à 30% (identique sur les trois régions considérées). De plus, une évolution du matériel de récolte de la paille est à prévoir et permettra de récolter environ 4,5 tonnes de pailles par hectare pour un rendement en grain d'environ 9,8 tonnes, contre 3 tonnes de pailles récoltables par hectare aujourd'hui. De ce fait, la quantité moyenne de paille exportée estimée à l'horizon 2009 est de 1,35 tonnes à l'hectare.

Dans un scénario prospectif, il a également été estimé que les repousses de colza seraient favorisées (rôle de culture intermédiaire piège à nitrates) : ceci implique une légère modification de l'itinéraire technique et des passages d'outil pour la destruction de ces repousses.

Les temps de passages ont été réévalués, en tenant compte de la nouvelle proportion de surfaces labourées et de la destruction des repousses de colza.

En revanche, les données d'application de produits phytosanitaires ainsi que d'irrigation n'ont pas été modifiées par rapport au scénario de référence.

2009	Beauce	Marne	Somme	valeurs moyennes
Surfaces	194000	172000	182000	
Rendement 2009 (qt/ha)	98	98	98	98
% pailles exportée 2009	30%	30%	30%	30%
Doses d'azotes 2009	178.0	186.9	187.2	183.8
Phytosanitaires : kg/ha	1.74	2.62	3.77	2.69
<i>Herbicide</i>	0.3	1.3	1.1	0.9
<i>Fongicide</i>	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Insectide</i>	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Substance croissance</i>	1.2	1.0	2.3	1.5
Temps de passage tracteur	3.68	3.50	3.35	3.51
Nb passages d'automotrice	1.00	1.00	1.00	1.00
Nb passages d'outils	12.61	15.08	13.93	13.82
% Labour / non labour	30%	40%	43%	37%
% irrigation de la culture de blé	50%	0%	0%	18%

22.3.2 Evolution de l'approvisionnement de la distillerie d'Origny compte tenu de l'augmentation sa capacité

Dans un scénario prospectif, l'usine de BENP située à Origny Saint Benoîte envisage une forte augmentation de sa capacité. De ce fait, la distance d'approvisionnement en blé sera plus élevée que dans le scénario de référence : il est prévu que l'approvisionnement soit effectué à 50% par rail (transport sur une distance moyenne de 120 km), à 20% par voie fluviale (distance moyenne de 60 km environ) et à 30% par route, par des camions de 25 tonnes effectuant une distance moyenne de 50 km.

22.3.3 Evolution technologique attendue pour l'étape de transformation industrielle

L'augmentation de la capacité de l'usine de BENP d'Origny sera accompagnée de changements technologiques majeurs à différents niveaux. La capacité de la future unité d'éthanol de blé envisagée est de l'ordre de 7 000 hl / jour. Un nouveau four de séchage devrait permettre une incinération des COV ainsi qu'une importante économie d'énergie par récupération des fumées. Tant par les installations actuelles que par les projets en cours, BENP fait figure d'usine pilote dans le domaine de la production d'éthanol à partir de blé.

De ce fait, pour ce scénario prospectif, les consommations énergétiques sont les suivantes :

- 602 MJ/hl (175 000 MJ/h) en gaz pour la production de vapeur à 60 bars qui sert à produire d'une part la vapeur basse pression (2,8 et 4 bars) nécessaire au process et d'autre part 26 kWh/hl d'électricité (7,6 MWh/h) ;
- 532 MJ/hl (155 000 MJ/h) en gaz pour le séchage des drêches : la vapeur émise est récupérée pour les besoins amont (distillation et concentration de vinasses).

Dans ce scénario prospectif, il est envisagé d'incorporer une chaudière à paille dans le schéma de production de vapeur et d'électricité de la future unité d'éthanol de blé. La chaudière considérée est du type de celle installée au Danemark à Haslev (cf. document danois de 1998 « Straw for Energy Production »). Il est prévu qu'elle soit installée en parallèle de la chaudière au gaz prévue dans le projet et qui alimente un turbo-alternateur en vapeur à 60 bars: cette chaudière à paille produirait 26 t/h de vapeur HP à 60 bars 450 °C qui serait envoyée également dans le turbo-alternateur pour produire 3,7 MWh/h d'électricité et 26 t/h de vapeur détendue.

Autrement dit, la chaudière à paille en fonctionnement réduirait l'allure de la chaudière à gaz de 50% (de 52 t/h à 26 t/h) et, en cas de panne de la chaudière à paille ou en cas de défaut d'approvisionnement en paille, la chaudière à gaz pourrait assurer seule les besoins en vapeur Haute Pression de l'usine.

Inversement, en cas de panne de la chaudière à gaz, la chaudière à paille pourrait assurer le fonctionnement de l'usine à mi-régime.

Pour les calculs, les rendements considérés pour les chaudières à paille et à gaz sont respectivement de 92% et 97%. Le PCi de la paille a été fourni par le site de BENP et s'élève à 15 MJ/kg.

L'économie en énergie gaz serait de 87 500 MJ/h (26 t/h vapeur HP à 3 365 MJ/t) soit 50% de la consommation pour la production de vapeur et d'électricité.

Les besoins annuels en paille sont estimés à 50 000 tonnes environ.

Les besoins totaux en gaz seraient alors de 242 500 MJ/h soit **830 MJ/hl** contre 1 351 MJ/hl actuellement, **soit une économie de 40% par rapport à la situation actuelle.**

Une partie de l'énergie consommée dans un scénario actuel sous forme de gaz naturel (non renouvelable) sera substituée dans un scénario prospectif par de l'énergie consommée sous forme de paille combustible (renouvelable). Cette substitution aura d'une part un impact sur la mobilisation d'énergie non renouvelable au cours de l'étape de transformation industrielle et un impact sur l'effet de serre puisque le CO₂ émis lors de la combustion de la paille est d'origine biomasse donc ne contribue pas à l'indicateur effet de serre.

22.3.4 Récupération du CO₂ fermentaire émis à des fins commerciales.

La récupération du CO₂ émis au niveau de l'étape de fermentation du moût est déjà pratiquée en Espagne. De la même façon, l'usine d'Origny compte mettre en place une installation de récupération du CO₂ fermentaire ; en effet, de nombreuses offres montrent qu'il existe une réelle demande en CO₂ d'origine fermentaire qui viendrait se substituer à du CO₂ d'origine fossile issu essentiellement de la filière de production d'ammoniac.

Dans le scénario prospectif, le CO₂ récupéré a donc été considéré comme un co-produit de la production d'éthanol. Selon les informations fournies par les industriels, il y a une réelle demande de CO₂ biologique en France. Les sites ont déjà des clients potentiels. En outre dans la filière actuelle de CO₂ provenant de la synthèse de l'ammoniac de nombreux sites de production vont fermer. Le CO₂ d'origine biologique peut être considéré comme un co-produit qui porterait évidemment une part des impacts de la filière.

D'après les offres techniques faites au site d'Origny, une nouvelle installation permettrait de récupérer 70% du CO₂ émis à l'étape de fermentation.

Le bilan énergétique et gaz à effet de serre tient donc compte de ce co-produit : les consommations ont donc été allouées, au prorata massique, entre le CO₂ récupéré et l'éthanol.

Le coefficient d'allocation est de 60%. Il a été calculé à partir de l'équation de réaction de fermentation suivante :

100 kg sucre → 51,11 kg d'alcool (éthanol) + 49,32 kg de CO₂ dont 70% récupéré (34,5 kg)

$$\text{coefficient d'allocation pour l'éthanol} = 51,11 / (51,11 + 34,5) = 60\%$$

22.4 Filière betterave

Les variantes prospectives pour la filière betterave portent sur :

- **l'étape de culture** de la betterave, pour laquelle on considère des données d'itinéraires techniques attendues dans les prochaines années, à l'échéance 2009 ;
- **l'étape de transformation industrielle**, pour laquelle il est prévu un certain nombre de changements en terme d'économie d'énergie au cours du procédé de distillation.

22.4.1 Variante prospective de l'étape de culture de betterave : évolutions attendues à l'horizon 2009

Des évolutions de rendement sont attendues sur la culture de betterave : le rendement, estimé à 74 tonnes / ha pour l'année 2009 a été calculé à partir du rendement de l'année 2002 (moyenne des années 1997 à 2001) et en tenant compte d'une augmentation de 1,9% par an (d'après la courbe de tendance des rendements des 20 dernières années).

Ces évolutions du rendement, liées au progrès génétique, n'induiront pas d'augmentation d'apports d'engrais azotés.

Il est également attendu que la proportion des surfaces cultivée en non labour évolue : le scénario prospectif prévoit qu'en moyenne, 15% des surfaces seront cultivées sans labour.

L'ITB a également estimé que certains éléments de la mécanisation allaient évoluer d'ici 2009 notamment au niveau du semis et de l'application des engrais. La technique d'enfouissement de l'azote au semis, employée sur environ 15% de la surface à l'horizon 2009 permet de diminuer le nombre de passage d'outil et améliore également l'utilisation de l'azote apporté. Elle est couplée à une réduction des apports d'azote sous forme minérale (ammonitrate et solution azotée). Ainsi, il a été considéré qu'en 2009, 90 unités d'azote sont toujours apportées sous forme de vinasses issues des distilleries, additionnées de 40 unités apportées sous forme minérale.

Les temps de passages ont été réévalués, en tenant compte de la nouvelle proportion de surfaces labourées et des surfaces sur lesquelles est employée la nouvelle technique d'enfouissement de l'azote au semis.

En revanche, la conduite de l'interculture, l'application de produits phytosanitaires ainsi que l'irrigation n'ont pas été modifiés par rapport au scénario de référence.

2009	valeurs moyennes
Surfaces	
Rendement 2009 (qt/ha)	74.15
Doses d'azotes 2009	130.0
Phytosanitaires : kg/ha	3.72
<i>Herbicide</i>	2.35
<i>Fongicide</i>	1.20
<i>Insectide</i>	0.16
Temps de passage tracteur	5.44
Nb passages d'automotrice	1.08
Nb passages d'outils	10.4
% Labour / non labour	85%
% enfouissement au semis	15%

22.4.2 Evolutions technologiques attendues pour l'étape de transformation industrielle des betteraves en éthanol

Les évolutions sont prévues au niveau de l'étape de transformation industrielle de l'amélioration du schéma énergétique distillation et déshydratation éthanol par mise en place industrielle des dernières technologies, à savoir triple effet en distillation et couplage des unités de distillation et de déshydratation.

Au cours de ces dernières années, beaucoup d'installations standards de distillation en simple effet ont été modernisées en appliquant le passage du simple au double effet et en complétant par l'utilisation éventuelle de la compression mécanique ou thermique de vapeur. La consommation spécifique de vapeur a été ainsi divisée par plus de deux en passant de 240 à 100 kg de vapeur par hl (c'est le cas du site d'Arcis s/Aube dans le scénario de référence précédemment étudié).

Il est techniquement et économiquement possible d'aller plus loin encore et de passer du double au triple effet : la distillerie de Bétheniville (Cristal Union) a été ainsi équipée d'un atelier de rectification en triple effet en 2001 (alcool brut rectifié en surfon) et cette adaptation de la technologie n'a posé aucun problème.

La variante technologique ici prise en compte est celle retenue pour le projet Cristanol du Groupe Cristal Union : l'atelier de distillation betteraves fonctionnerait en triple effet en campagne betteraves (5 000 à 6 000 hl/j) et en double effet en inter-campagne compte tenu d'un débit plus faible (2 500 à 3 000 hl/J). D'autre part, le fonctionnement d'une telle unité étant garantie sur toute l'année, les besoins vapeur de la déshydratation d'éthanol peuvent être assurés par prélèvement sur la distillation de brut, ce qui permet une économie supplémentaire que nous affectons à la déshydratation. Les bases énergétiques prises en compte pour cette variante technologique sont les garanties proposées par les constructeurs en réponse à l'appel d'offre du projet Cristanol.

22.4.3 Récupération du CO₂ fermentaire émis à des fins commerciales.

De la même façon que pour la filière éthanol de blé, il est envisagé de récupérer le CO₂ d'origine fermentaire.

Dans le scénario prospectif, le CO₂ récupéré a donc été considéré comme un co-produit de la production d'éthanol en portant une part des impacts de la filière. Le bilan énergétique et gaz à effet de serre tient donc compte de ce co-produit : une partie des consommations est donc allouées, au prorata massique, au CO₂ récupéré.

La future installation permettra en principe de récupérer 70% du CO₂ émis à l'étape de fermentation.

Le bilan énergétique et gaz à effet de serre tient donc compte de ce co-produit : les consommations est donc été allouées, au prorata massique, entre le CO₂ récupéré et l'éthanol.

Le coefficient d'allocation est de 60% Il est calculé à partir de l'équation de réaction de fermentation :

100 kg sucre → 51,11 kg d'alcool (éthanol) + 49,32 kg de CO₂ dont 70% récupéré (34,5 kg)

$$\text{coefficient d'allocation pour l'éthanol} = 51,11 / (51,11 + 34,5) = 60\%$$

23 RESULTATS DES SIMULATIONS PROSPECTIVES DETAILLES PAR FILIERE

23.1 Essence 2009

Indicateurs énergétiques :

0.88 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie mobilisée pour l'extraction de pétrole, son transport, le raffinage en essence et la distribution au dépôt, d'essence aux spécifications 2009.

Il s'agit d'une amélioration relativement faible, de 0,6%, du bilan de la filière par rapport aux résultats pour le cas de référence.

Cette amélioration est liée à une diminution de la consommation énergétique de 8% pour le raffinage de l'essence en 2009, en comparaison avec 2005.

Indicateurs gaz à effet de serre :

La production d'essence et sa mise à disposition au dépôt de distribution représente une contribution à l'effet de serre d'environ de 430 g eq. CO₂ par kg d'essence, ou encore 10 g eq. CO₂ par MJ d'essence.

Les émissions de CO₂ contribuent à 99,7% à cet indicateur des émissions de gaz à effet de serre.

Là encore, il s'agit d'une amélioration relativement faible (gain de 4% sur les émissions de gaz à effet de serre) par rapport aux résultats pour le cas de référence.

Après combustion, cette amélioration représente moins de 1% du bilan global.

23.2 Gazole 2009

Indicateurs énergétiques :

0.905 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie mobilisée pour l'extraction de pétrole, son transport, le raffinage en gazole et la distribution au dépôt, du gazole aux spécifications 2009.

Il s'agit d'une diminution des performances de la filière de production relativement faible, de moins 0.4%, du bilan de la filière par rapport aux résultats pour le cas de référence.

Cette diminution des performances est liée à une augmentation de la consommation énergétique de 11% pour le raffinage du gazole en 2009, en comparaison avec 2005.

Indicateurs gaz à effet de serre :

La production de gazole et sa mise à disposition au dépôt de distribution représentent une contribution à l'effet de serre de 338 g eq. CO₂ par kg de gazole, ou encore 7.9 g eq. CO₂ par MJ de gazole.

Les émissions de CO₂ contribuent à 99.7% à cet indicateur des émissions de gaz à effet de serre.

Là encore, les performances de la filière de production de gazole sont diminuées par rapport au cas de référence, avec une augmentation de 24% de l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre avant combustion. Après hypothèse de combustion, cette augmentation représente 7% du bilan global gaz à effet de serre.

23.3 Filière colza

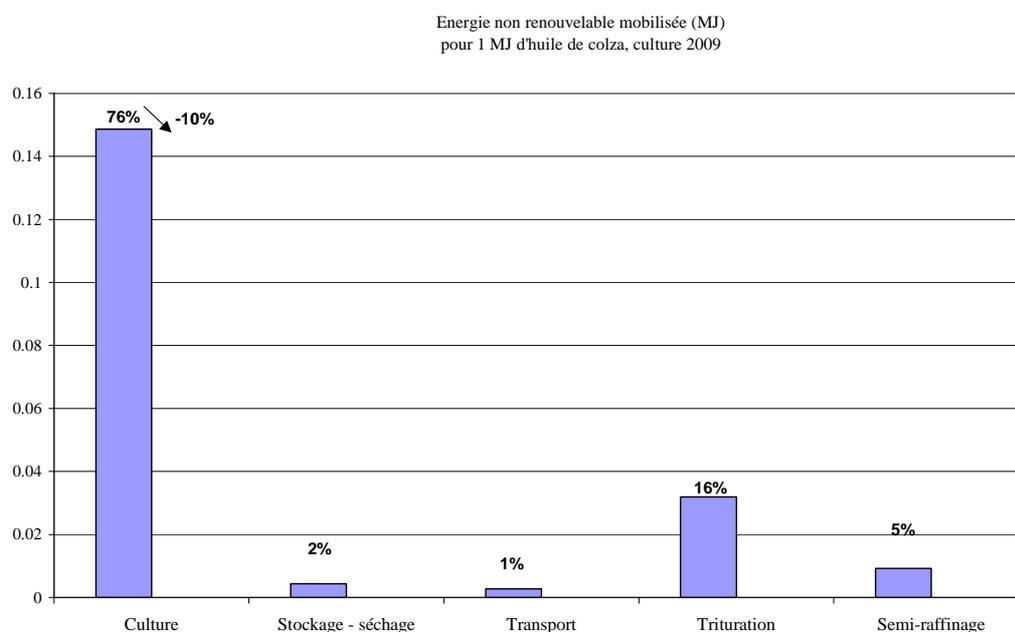
23.3.1 Huile de colza

Indicateurs énergétiques :

Près de 5,1 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'huile de colza, dans le cas d'une production agricole selon le rendement et les caractéristiques 2009.

Cette performance énergétique peut se traduire comme une production nette (énergie restituée – énergie non renouvelable mobilisée) de 10 MJ par m² de surface cultivée en colza.

Il s'agit d'une amélioration des performances de 8% de la filière, en comparaison avec le cas de référence, qui est imputable intégralement à l'amélioration du rendement et du bilan de l'étape de culture.



On retrouve une contribution relative des étapes avec une contribution majeure de l'étape de culture :

- 76% pour l'étape de culture ;
- 16% pour l'étape de trituration.

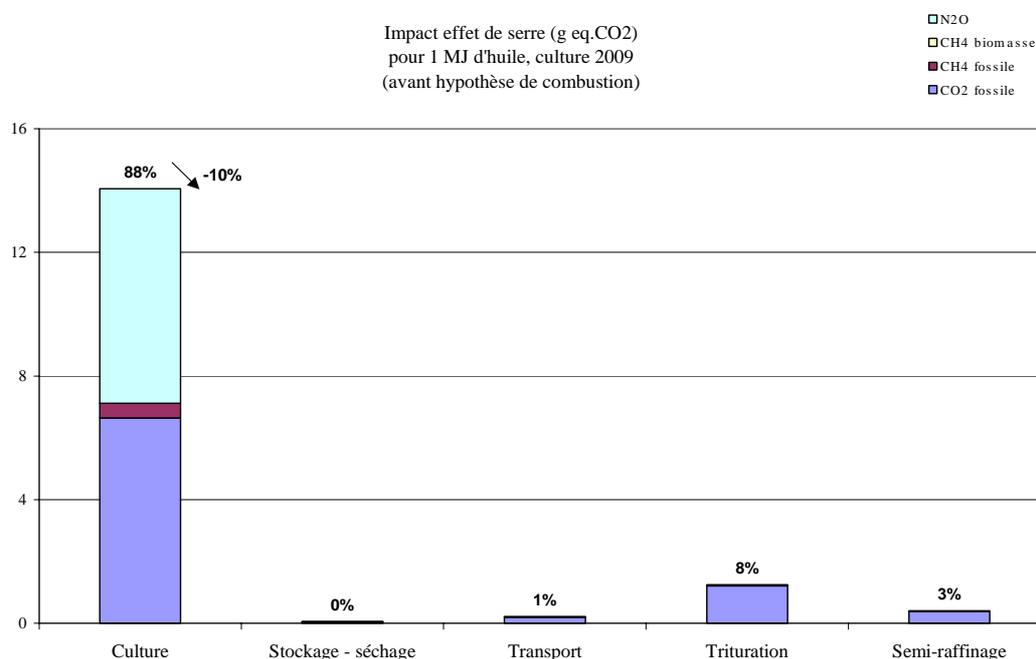
Indicateur gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 600 g eq. CO₂ par kg d'huile de colza produite, ou encore de 16,2 g eq. CO₂ par MJ d'huile de colza produite.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 50% aux émissions de CO₂, et à près de 45% aux émissions de N₂O liées à la culture du colza.

Là encore, il s'agit d'une amélioration des performances de 9% de la filière, en comparaison avec le cas de référence, qui est imputable intégralement à l'amélioration du rendement et du bilan de l'étape de culture.

Comme pour le cas de référence, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est essentiellement lié à la culture du colza (88%).



Guide de lecture : Amélioration du bilan gaz à effet de serre de l'étape de culture de 10%

23.3.2 EMHV de colza

Les améliorations de l'étape de culture observées sur le bilan de l'huile se retrouvent dans le bilan de l'EMHV de colza.

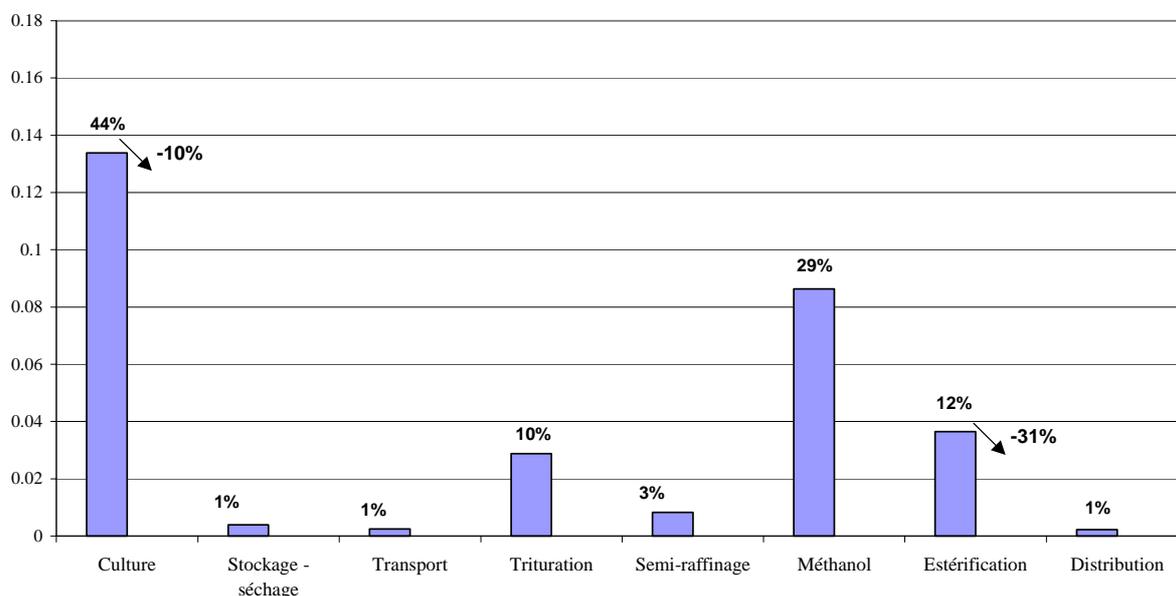
23.3.2.1 Simulation d'estérification de type "Compiègne"

Indicateur énergétique :

Le bilan de la filière de production d'EMHV prospective, avec une estérification de type "Compiègne" est de 0,302 MJ d'énergie non renouvelable mobilisée par MJ d'EMHV, ou encore un ratio d'énergie restituée par rapport à l'énergie non renouvelable mobilisée de 3,3.

Cela correspond à une amélioration de 10% du bilan énergétique de la filière, liée à une amélioration de près de 10% pour l'étape de culture, et de 30% pour l'étape d'estérification.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'EMHV, culture 2009 et estérification Compiègne



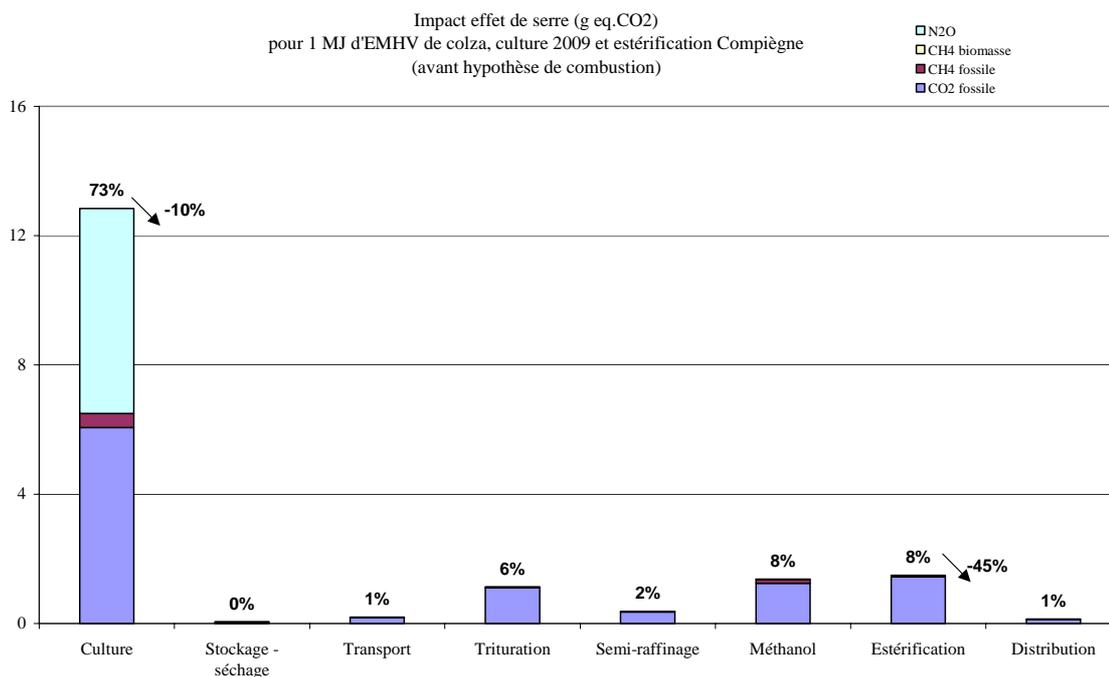
Guide de lecture :

- amélioration du bilan énergétique de l'étape de culture de 10%
- amélioration du bilan énergétique de l'étape d'estérification de 31%

Indicateurs gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre avant combustion sont d'environ 660 g eq. CO₂ par kg d'EMHV de colza produit, ou encore de 17,6 g eq. CO₂ par MJ d'EMHV de colza produit, dans cette simulation prospective.

Il s'agit d'une diminution de 13% des émissions de gaz à effet de serre de la filière, liées à une diminution de ces émissions de près de 10% sur l'étape de culture, et de 45% sur l'étape d'estérification.



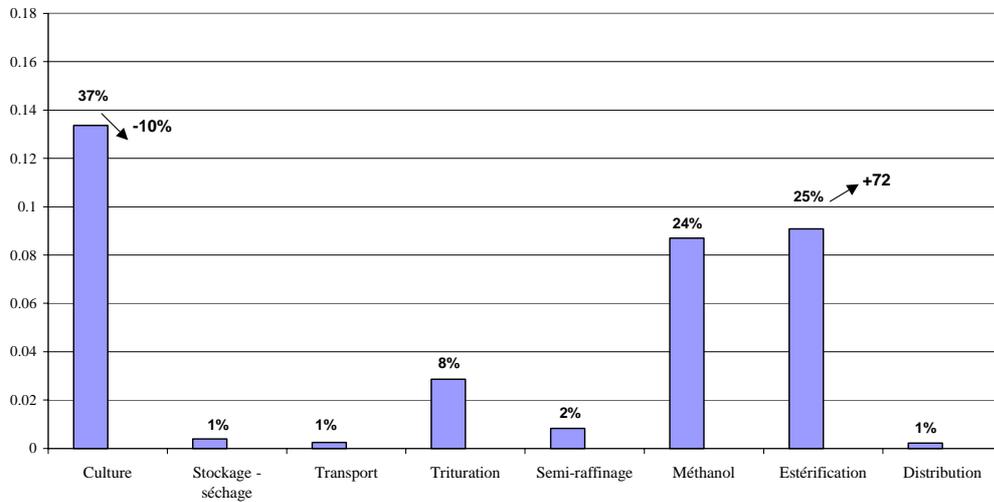
23.3.2.2 Simulation d'estérification par "Catalyse hétérogène"

Indicateur énergétique :

Le bilan de la filière de production d'EMHV prospective, avec une estérification par catalyse hétérogène est de 0.357 MJ d'énergie non renouvelable mobilisée par MJ d'EMHV, ou encore un ratio d'énergie restituée par rapport à l'énergie non renouvelable mobilisée de 2.8.

Cela correspond à une diminution de 7% des performances du bilan énergétique de la filière, liée d'une part à une amélioration de près de 10% pour l'étape de culture, et d'autre part à une diminution des performances énergétiques voisine de 72% pour l'étape d'estérification.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'EMHV, culture 2009 et catalyse hétérogène (procédé IFP)



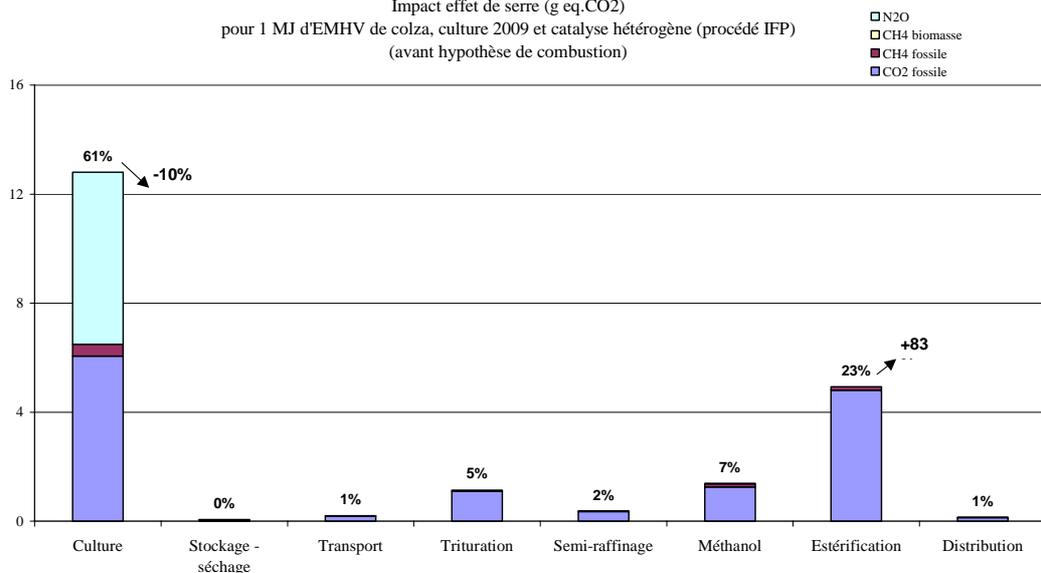
Guide de lecture :
- amélioration du bilan énergétique de l'étape de culture de 10%
- dégradation du bilan énergétique de l'étape d'estérification de 72%

Indicateurs gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre avant combustion sont de 785 g eq. CO₂ par kg d'EMHV de colza produit, ou encore de 21 g eq. CO₂ par MJ d'EMHV de colza produit, dans cette simulation prospective.

Il s'agit d'une augmentation de 4% des émissions de gaz à effet de serre de la filière, liées d'une part à une diminution de ces émissions de près de 10% sur l'étape de culture, et d'autre part à une augmentation de plus de 80% des émissions sur l'étape d'estérification.

Impact effet de serre (g eq.CO2)
pour 1 MJ d'EMHV de colza, culture 2009 et catalyse hétérogène (procédé IFP)
(avant hypothèse de combustion)



Guide de lecture :
- amélioration du bilan gaz à effet de serre de l'étape de culture de 10%
- dégradation du bilan gaz à effet de serre de l'étape d'estérification de 83%

23.4 Filière tournesol

23.4.1 Huile de tournesol

Indicateurs énergétiques :

Près de 5.8 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'huile de tournesol, dans le cas d'une production agricole selon le rendement et les caractéristiques 2009.

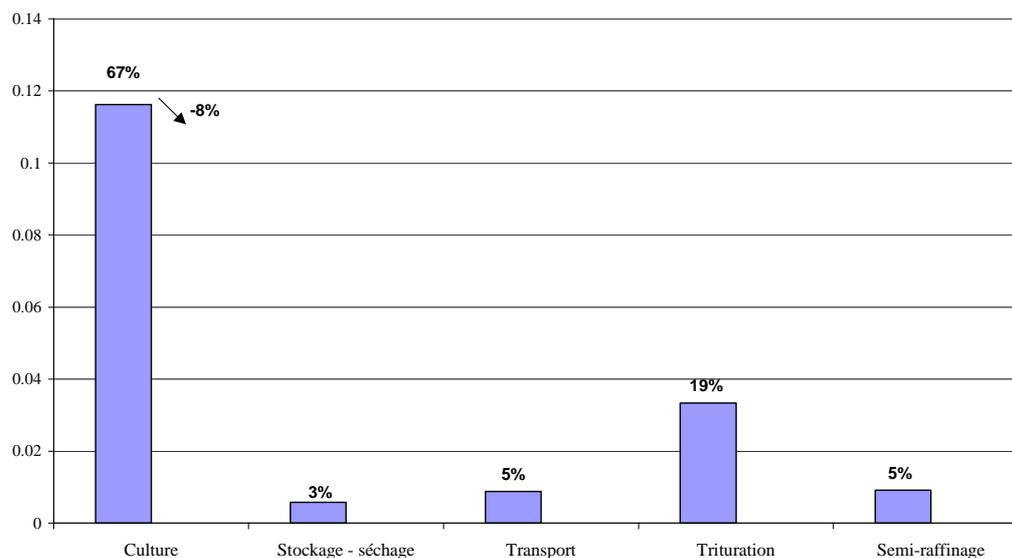
Cette performance énergétique peut se traduire comme une production nette (énergie restituée – énergie non renouvelable mobilisée) de 7.4 MJ par m² de surface cultivée en tournesol.

Il s'agit d'une amélioration des performances de 5% de la filière, en comparaison avec le cas de référence, qui est imputable intégralement à l'amélioration du rendement et du bilan de l'étape de culture.

On retrouve une contribution relative des étapes avec une contribution majeure de l'étape de culture :

- 67% pour l'étape de culture ;
- 19% pour l'étape de trituration.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'huile de tournesol, culture 2009

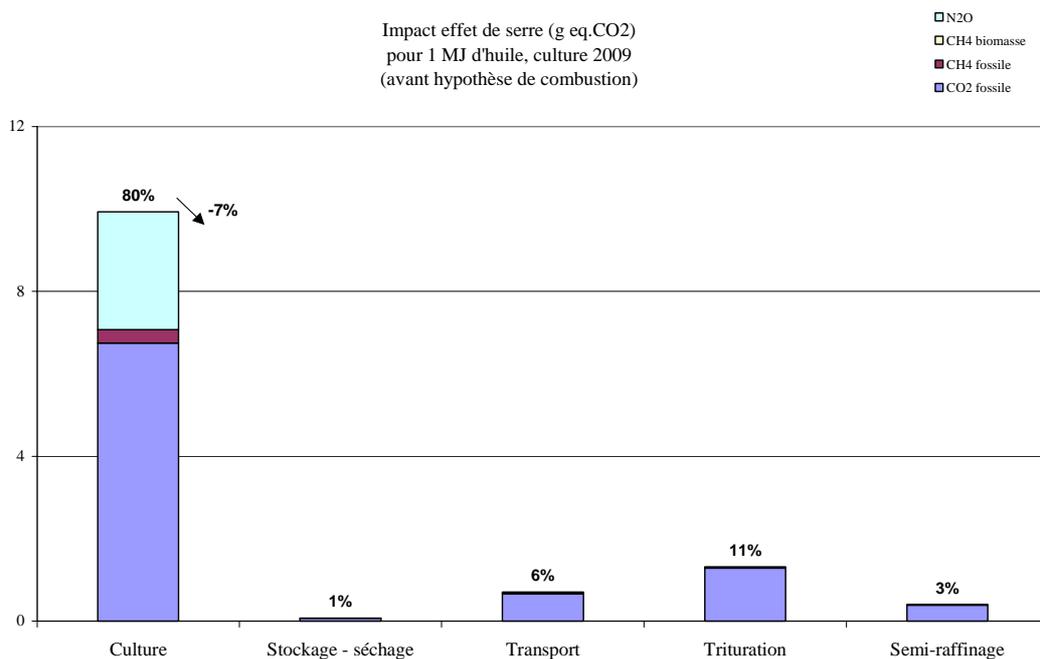


Indicateurs gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 470 g eq. CO₂ par kg d'huile de tournesol produite, ou encore de 12.4 g eq. CO₂ par MJ d'huile de tournesol produite.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 73% aux émissions de CO₂, et à 23% aux émissions de N₂O liées à la culture du tournesol.

Il s'agit d'une amélioration des performances de la filière de 6% en comparaison avec le cas de référence vis-à-vis de l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre, qui est imputable intégralement à l'amélioration du rendement et du bilan de l'étape de culture.



23.4.2 EMHV de tournesol

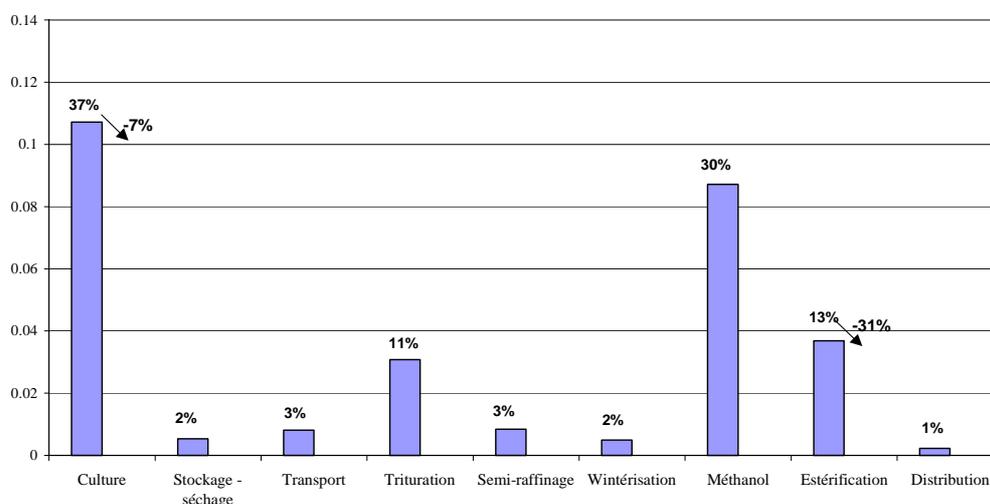
Les améliorations de l'étape de culture observées sur le bilan de l'huile se retrouvent dans le bilan de l'EMHV de tournesol.

23.4.2.1 Simulation d'estérification de type "Compiègne"

Comme pour l'EMHV de Colza, cette simulation permet une amélioration significative du bilan de l'EMHV de tournesol liée à une amélioration de près de 10% pour l'étape de culture, et de 30% pour l'étape d'estérification :

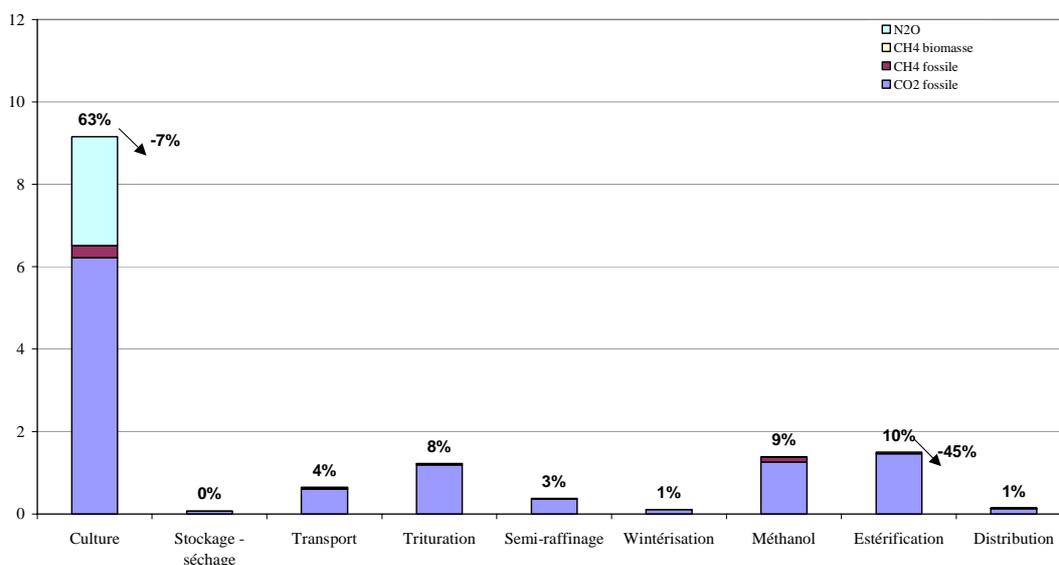
- gain de 8% sur la mobilisation d'énergie par MJ de produit ;
- gain de 12% sur les émissions de gaz à effet de serre avant combustion de l'EMHV.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'EMHV, culture 2009 et estérification Compiègne



Guide de lecture :
- amélioration du bilan énergétique de l'étape de culture de 7%
- amélioration du bilan énergétique de l'étape d'estérification de 31%

Impact effet de serre (g eq.CO2)
pour 1 MJ d'EMHV de tournesol, culture 2009 et estérification Compiègne
(avant hypothèse de combustion)



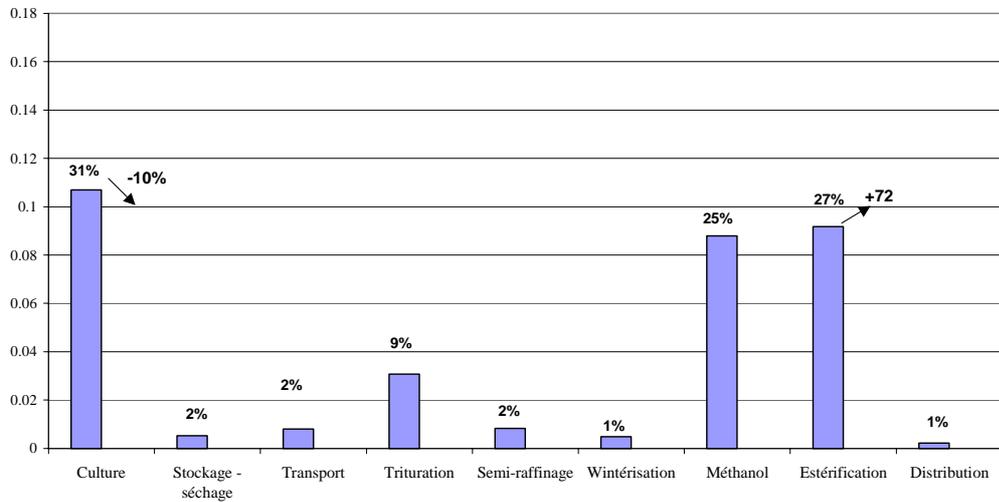
23.4.2.2 Simulation d'estérification par "Catalyse hétérogène"

Comme pour l'EMHV de Colza, cette simulation diminue les performances du bilan de l'EMHV de tournesol du point de vue énergétique : augmentation de 9% de la mobilisation d'énergie par MJ de produit.

La diminution des performances s'exprime également du point de vue de l'effet de serre : l'indicateur des émissions avant combustion augmente de 9%.

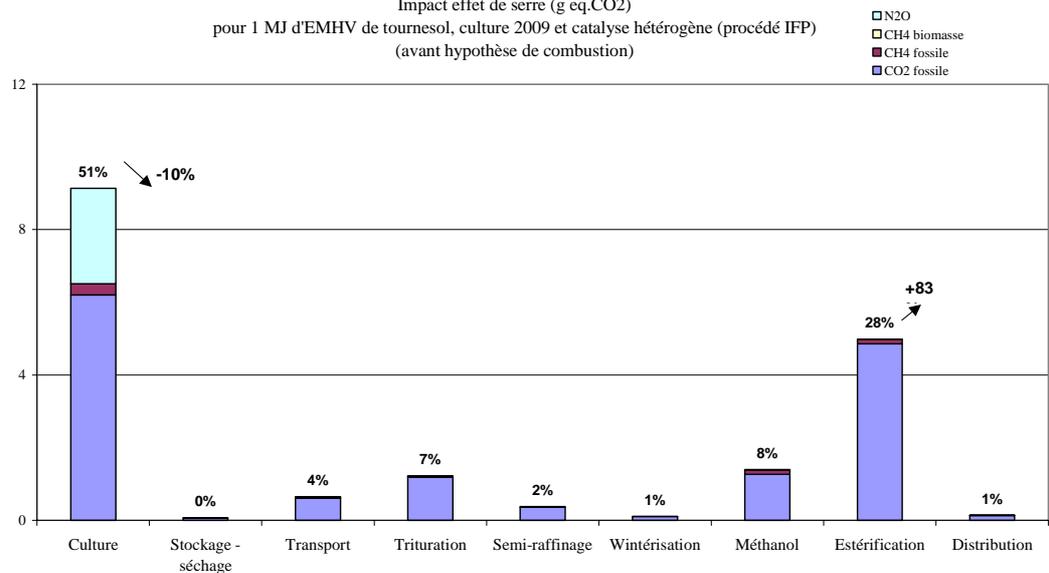
Dans cette simulation, les bénéfices permis par l'étape de culture sont compensés par la perte de performance au niveau de l'estérification.

Energie non renouvelable mobilisée (MJ)
pour 1 MJ d'EMHV, culture 2009 et catalyse hétérogène (procédé IFP)



Guide de lecture :
- amélioration du bilan énergétique de l'étape de culture de 10%
- dégradation du bilan énergétique de l'étape d'estérification de 72%

Impact effet de serre (g eq.CO2)
pour 1 MJ d'EMHV de tournesol, culture 2009 et catalyse hétérogène (procédé IFP)
(avant hypothèse de combustion)



Guide de lecture :
- amélioration du bilan gaz à effet de serre de l'étape de culture de 10%
- dégradation du bilan gaz à effet de serre de l'étape d'estérification de 83%

23.5 Filière blé

23.5.1 Ethanol de blé

Indicateurs énergétiques :

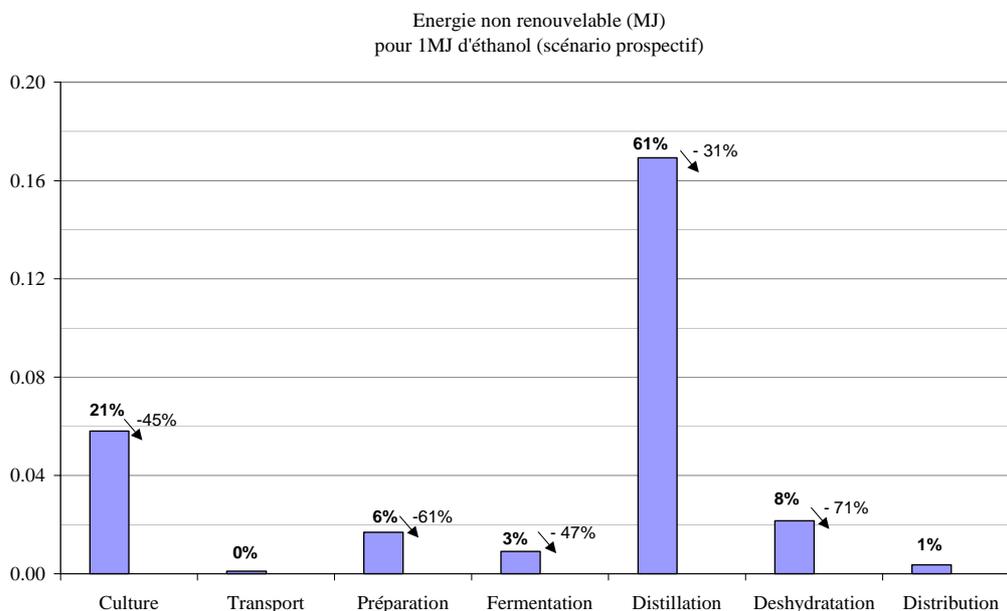
Près de 3,6 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'éthanol de blé contre 2 MJ dans le scénario de référence (actuel).

L'énergie non renouvelable mobilisée est voisine de **0,28 MJ** par MJ d'éthanol produit contre **0,49 MJ** par MJ d'éthanol produit dans le scénario de référence : cette diminution de 43% environ a deux principales explications :

- la mise en place d'une chaudière à paille qui a permis une diminution des consommations énergétiques sur l'ensemble des étapes de transformation industrielle ; en effet, le bilan amont de production de la paille en terme d'énergie non renouvelable est largement inférieur à celui du gaz naturel. La mise en place d'un nouveau dispositif de séchage de drèches moins consommateur d'énergie, considéré dans ce scénario prospectif explique en partie la diminution des consommations de l'étape de distillation ;
- la mise en place d'une installation de récupération du CO₂, considéré alors comme coproduit de l'éthanol : de ce fait, 40% des consommations de l'étape de fermentation et des étapes amont sont imputées au CO₂.

Cette performance énergétique peut se traduire comme une production nette (énergie restituée – énergie non renouvelable mobilisée) de 19,7 MJ par m² de surface cultivée en blé.

L'augmentation de rendement de la culture combinée avec une amélioration du bilan énergétique sur l'ensemble de la filière a permis d'améliorer la performance énergétique par unité de surface de près de 11 MJ/m². (soit une amélioration de 140%).



La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- 21% à l'étape de distillation, fortement consommatrice de vapeur ;
- 61% à l'étape de culture du blé.

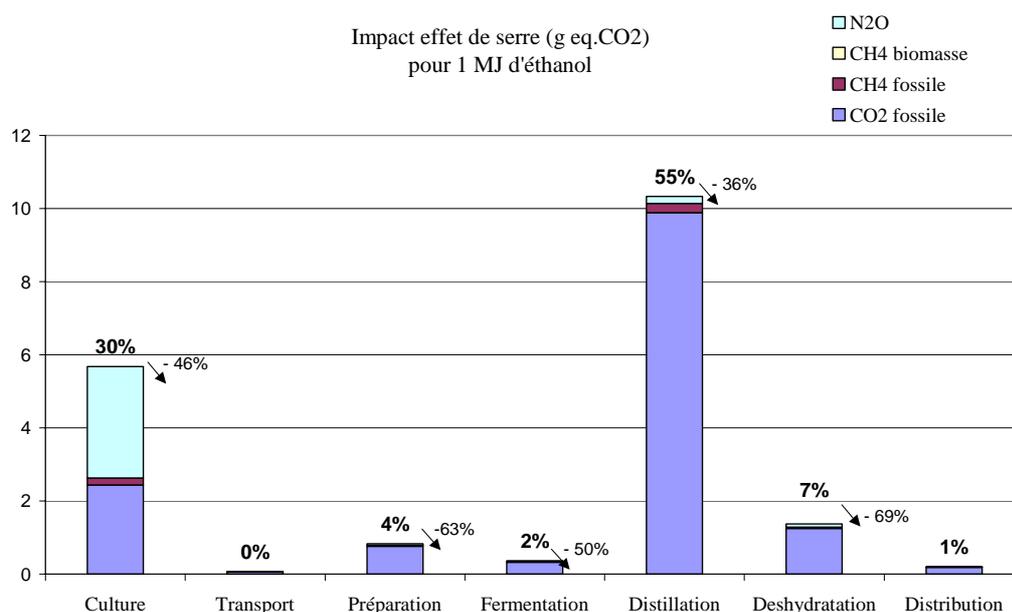
La contribution des étapes de culture, préparation du moût et fermentation est nettement inférieure dans ce scénario prospectif, du fait de l'amélioration du rendement de la culture de blé et de la mise en place de la récupération du CO₂ fermentaire. Le bilan de l'ensemble des étapes de transformation industrielle est fortement diminué grâce à l'utilisation de la paille comme combustible.

Indicateurs gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 500 g eq. CO₂ par kg d'éthanol de blé produit contre 920 g eq. CO₂ dans le scénario de référence, ou encore de 18,8 g eq. CO₂ par MJ d'éthanol produit. La diminution globale de l'impact sur l'ensemble de la filière est de l'ordre de 45% et s'explique à la fois par :

- la mise en place d'une installation de récupération du CO₂ d'origine fermentaire ;
- l'amélioration du rendement de la chaudière produisant de la vapeur ;
- la substitution du gaz naturel par de la paille dans la chaudière (émissions de CO₂ biomasse lors de la combustion, ne contribuant donc pas à l'effet de serre) ;
- l'économie d'énergie réalisée sur l'étape de séchage des drèches ;
- la substitution du fuel par du gaz naturel comme combustible du four de séchage des drèches.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 80% aux émissions de CO₂, et à près de 18% aux émissions de N₂O liées à l'étape de culture.



L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à près de 55% à l'étape de distillation ;
- à 30% à l'étape de culture.

Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'éthanol de blé, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est identique à celui avant combustion du produit : en effet, tout le carbone de l'éthanol qui est brûlé correspond à du carbone biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre.

23.5.2 ETBE de blé

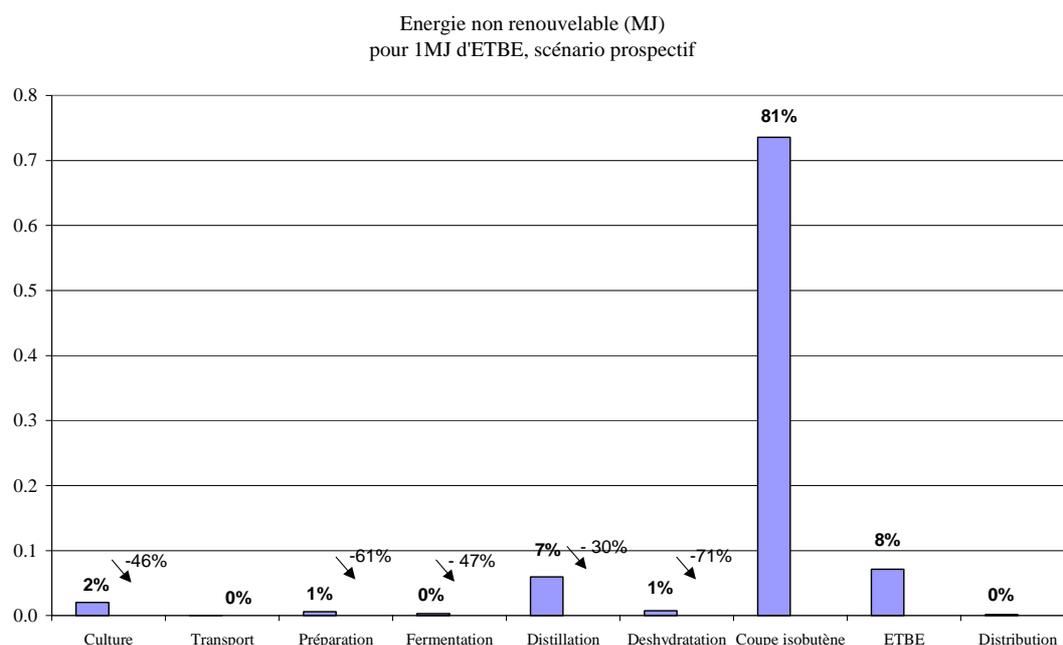
Les améliorations de l'étape de transformation industrielle observées sur le bilan de l'éthanol se retrouvent dans le bilan de l'ETBE de blé.

Indicateurs énergétiques :

Près de **1,1 MJ** d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'ETBE de blé contre **1,02 MJ** d'énergie restituée par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée dans le scénario de référence étudié (situation actuelle).

L'énergie non renouvelable mobilisée diminue d'environ 8% par rapport au scénario de référence : elle est voisine de **0,91 MJ** par MJ d'ETBE produit contre **0,98 MJ** par MJ d'ETBE dans le scénario de référence. De la même façon que pour le bilan éthanol, cette diminution est liée :

- à la mise en place d'une installation de récupération du CO₂ d'origine fermentaire ;
- à l'amélioration du rendement de la chaudière produisant de la vapeur ;
- à la substitution du gaz naturel par de la paille dans la chaudière ;
- à l'économie d'énergie réalisée sur l'étape de séchage des drèches ;
- à la substitution du fuel par du gaz naturel comme combustible du four de séchage des drèches.



La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

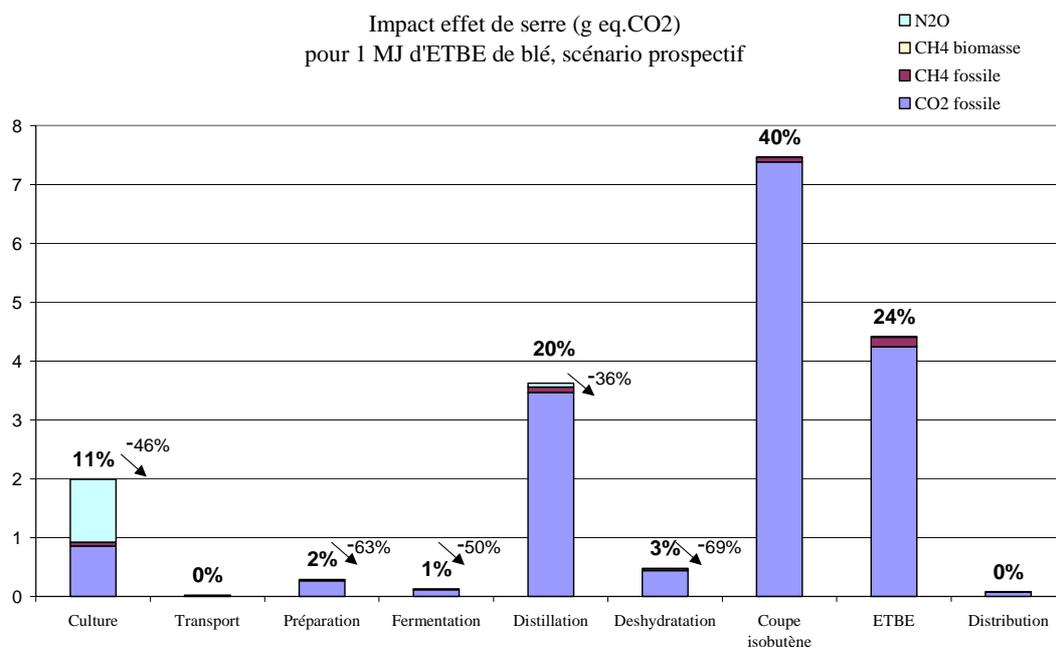
- 81% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- 8% à l'étape de synthèse de l'ETBE.

Du fait des changements opérés sur l'étape de transformation industrielle (notamment l'étape de distillation), celle-ci contribue faiblement à la mobilisation d'énergie non renouvelable de l'ensemble de la filière). Au total, ces évolutions sur l'étape de transformation industrielle permettent de diminuer de 43% la mobilisation énergétique.

Indicateurs gaz à effet de serre :

Avant hypothèse de combustion, les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 664 g eq. CO₂ par kg d'ETBE de blé produit, ou encore de **18,5 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE produit** (contre **24 g eq. CO₂ par MJ** dans un scénario de référence) soit une amélioration de 30%.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 87% aux émissions de CO₂, et à près de 10% aux émissions de N₂O liées à l'étape de culture.



L'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- 40% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- 24% à l'étape de synthèse de l'ETBE ;
- 20% à l'étape de distillation ;
- 11% à l'étape de culture.

De la même façon que pour le bilan de l'éthanol de blé, le bilan gaz à effet de serre de l'ETBE est amélioré notamment du fait de la récupération du CO₂ de l'étape de fermentation, de l'amélioration des consommations énergétiques au cours du procédé de transformation industrielle (sécheur de drèches) et du fait de la substitution du gaz naturel par de la paille pour l'alimentation de la chaudière et du fuel par du gaz naturel pour le four de séchage. Ces évolutions permettent de diminuer les émissions de gaz à effet de serre de 46%.

Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'ETBE de blé, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre se voit augmenté de la part de produit issu de ressources fossiles (la coupe isobutène), brûlant dans le produit. La combustion de la part d'éthanol dans l'ETBE ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre (carbone biomasse).

Ainsi, la combustion de l'ETBE correspond à un bilan total en gaz à effet de serre de 2335 g eq. CO₂ par kg d'ETBE, ou encore de **65,1 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE** (contre **70,5 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE** dans le scénario de référence), soit un gain d'environ 8%.

23.6 Filière betterave

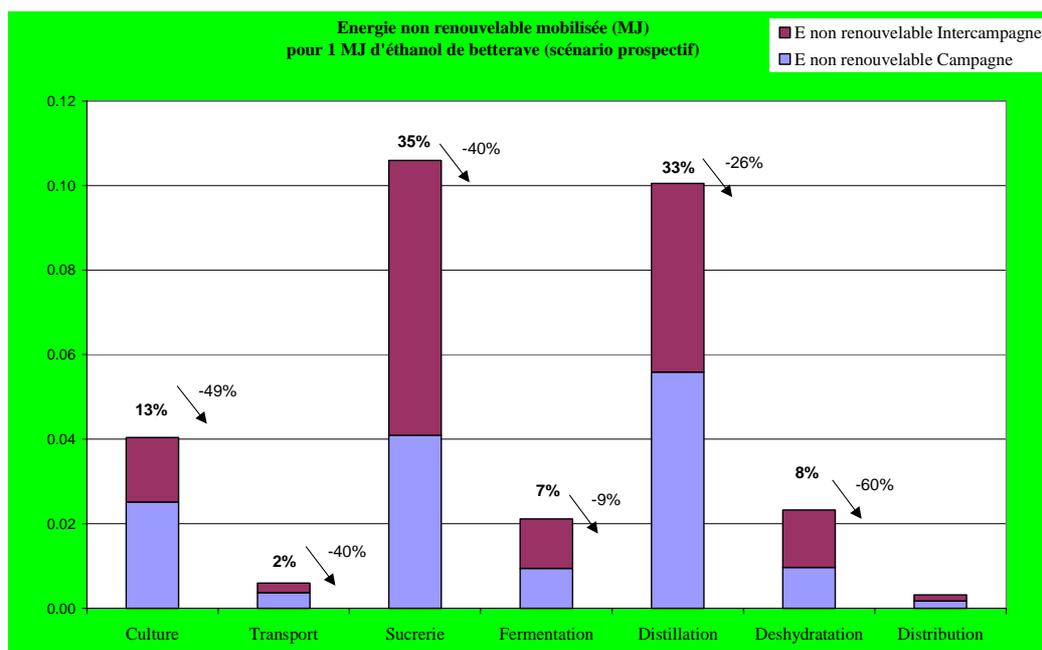
23.6.1 Ethanol de betterave

Indicateurs énergétiques :

Près de 3,33 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'éthanol de betterave contre 1,8 MJ/MJ dans le scénario de référence (situation actuelle).

L'énergie non renouvelable mobilisée est voisine de **0,30 MJ** par MJ d'éthanol produit contre **0,56 MJ** par MJ d'éthanol produit dans le scénario de référence.

La diminution d'énergie non renouvelable mobilisée est de l'ordre de 38% ; cette diminution provient essentiellement de la mise en place d'une installation de récupération du CO₂, qui est alors considéré comme co-produit auquel sont imputées une partie des consommations des étapes de culture, et des étapes de transformation de la betterave en vin. Cette diminution est également liée à l'amélioration du bilan énergétique des étapes de distillation et deshydratation de l'alcool. En effet, le scénario prospectif tient compte l'atelier de distillation fonctionnant à triple effet et couplé à l'atelier de deshydratation. Enfin, l'étape de culture voit également son bilan diminué du fait de l'amélioration du rendement, de la diminution des apports d'azote et de la diminution de la mécanisation (augmentation des surfaces cultivées en non labour).



La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

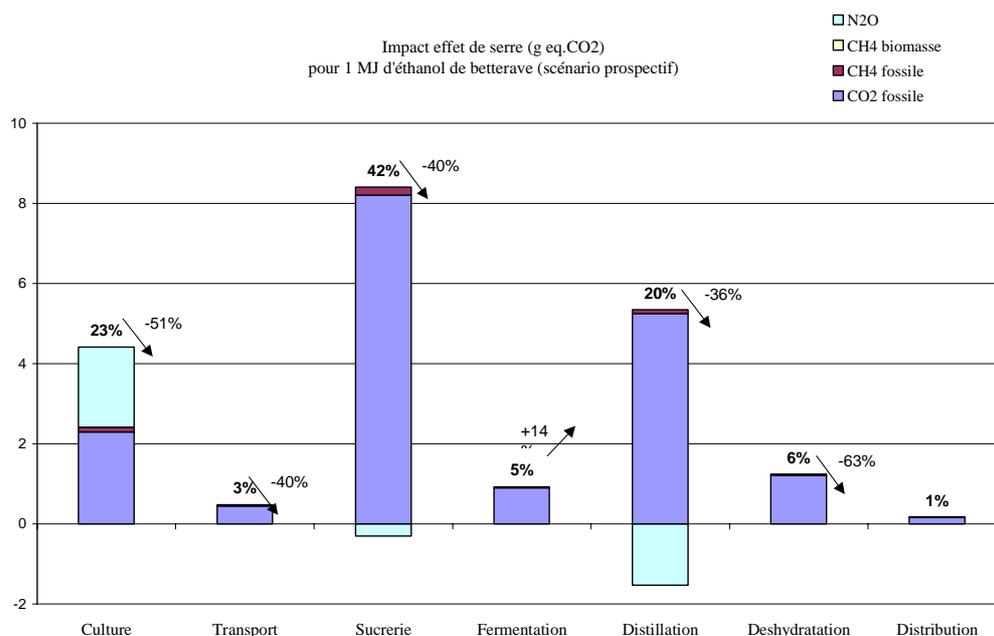
- 35% à l'étape de synthèse des substrats en sucrerie, fortement consommatrice de vapeur ;
- 33% à l'étape de distillation ;
- 13% à l'étape de culture de la betterave, dont 30% en liaison avec la synthèse des engrais azotés et 44% en liaison avec la mécanisation.

Rappelons qu'il a été considéré comme dans le scénario de référence que 55% de l'éthanol est produit en période de campagne betteravière donc à partir des substrats « sirop » et « égout » et que 45% de l'éthanol est produit en période d'intercampagne, à savoir à partir de jus vert et d'une faible quantité d'égout pauvre.

Indicateurs gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de 513 g eq. CO₂ par kg d'éthanol de betterave produit, ou encore de 19,1 g eq. CO₂ par MJ d'éthanol produit contre 37,1 g eq. CO₂ dans le scénario de référence. De la même façon que pour la mobilisation d'énergie non renouvelable, les émissions de gaz à effet de serre sont diminuées d'environ 49% par rapport au scénario de référence.

L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 98% aux émissions de CO₂.



L'impact sur l'effet de serre est principalement lié aux étapes suivantes :

- à 42% pour l'étape de synthèse des substrats issus de la sucrerie ;
- à 23% pour l'étape de culture de la betterave ;
- à 20% à l'étape de distillation.

La diminution des émissions de gaz à effet de serre est de l'ordre de 43% ; de la même façon que pour le bilan énergétique, cette diminution provient essentiellement de la mise en place d'une installation de récupération du CO₂ et l'amélioration du bilan énergétique des étapes de distillation et deshydratation de l'alcool. Enfin, l'étape de culture voit également son bilan diminué du fait de l'amélioration du rendement, de la diminution des apports d'azote et de la diminution de la mécanisation (augmentation des surfaces cultivées en non labour). En contrepartie, l'installation d'un atelier de dégazage du vin entraîne une légère augmentation de la contribution de l'étape de fermentation.

Rappelons que l'étape de distillation produit des vinasses destinées à l'épandage. La méthodologie adoptée pour prendre en compte ce co-produit valorisé a été de considérer que l'épandage des vinasses permet d'éviter l'usage d'engrais sous forme minérale (ammonitrate) donc d'éviter des consommations d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre liées à la synthèse des engrais ainsi que les émissions de N₂O liées à l'application de ces engrais minéraux. Ceci explique pourquoi l'étape de distillation présente un indicateur d'impact sur l'effet de serre négatif.

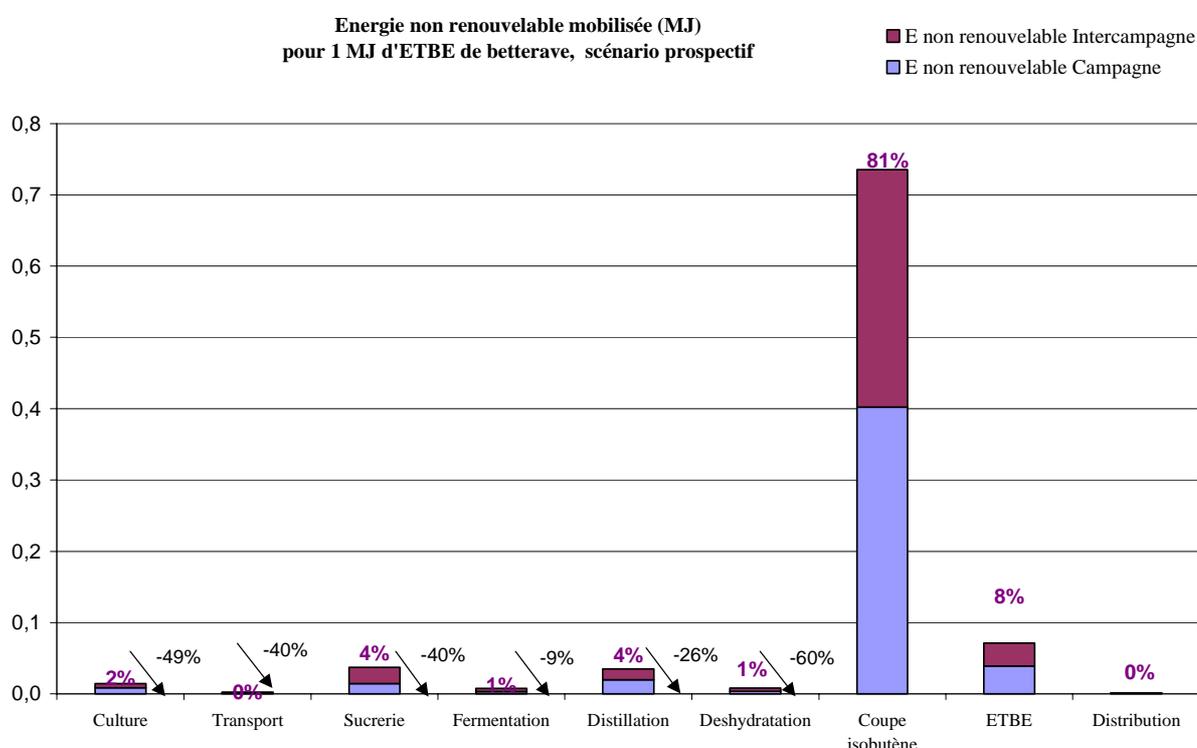
Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'éthanol de betterave, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est identique à celui avant combustion du produit : en effet, tout le carbone de l'éthanol qui est brûlé correspond à du carbone biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre.

23.6.2 ETBE de betterave

Indicateurs énergétiques :

Près de **1,1 MJ** d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'ETBE de betterave.

L'énergie non renouvelable mobilisée est voisine de **0,91 MJ** par kg d'ETBE produit contre **0,96 MJ** par kg dans le scénario de référence. Cette diminution de 5% du bilan de l'énergie non renouvelable mobilisée s'explique de la même façon que pour le bilan de l'éthanol de betterave.



La mobilisation d'énergie non renouvelable se répartit comme suit :

- à près de 81% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- à 8% à l'étape de synthèse de l'ETBE
- à 4% à l'étape de synthèse des substrats issus de la sucrierie, à l'étape de distillation

Indicateurs gaz à effet de serre :

Les émissions de gaz à effet de serre sont voisines de **670 g eq. CO₂** par kg d'ETBE de betterave produit, ou encore de **18 g eq. CO₂** par MJ d'ETBE produit contre 22,5 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE. Cette diminution des émissions de 20% s'explique de la même façon que pour le bilan de l'éthanol de betterave.

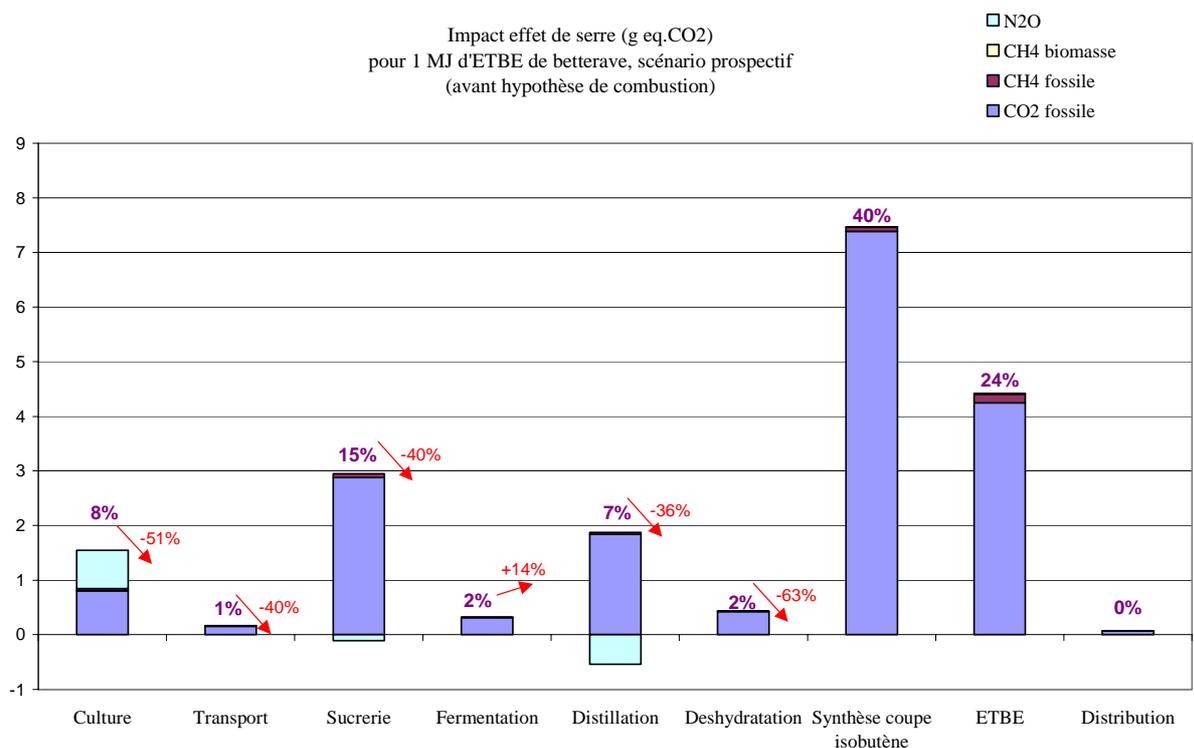
L'indicateur gaz à effet de serre est lié à plus de 98% aux émissions de CO₂. La contribution des émissions de N₂O est très faible puisque l'azote est appliqué sous forme organique (vinasses).

La contribution relative des différentes étapes reste relativement inchangée par rapport au bilan du scénario de référence : l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre est lié :

- à 40% à l'étape de synthèse de la coupe isobutène ;
- à 24% à l'étape de synthèse de l'ETBE.
- à 15% à l'étape de synthèse des substrats issus de la sucrerie, utilisés en distillerie ;
- à 8% à l'étape de culture ;

Dans l'hypothèse d'une combustion totale de l'ETBE de betterave, l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre se voit augmenté de la part de produit issu de ressources fossiles (la coupe isobutène), brûlant dans le produit. La combustion de la part d'éthanol dans l'ETBE ne contribue pas à l'augmentation de l'effet de serre (carbone biomasse).

Ainsi, la combustion de l'ETBE correspond à un bilan total en gaz à effet de serre de 2340 g eq. CO₂ par kg d'ETBE, ou encore de 65,2 g eq. CO₂ par MJ d'ETBE.



24 SYNTHÈSE DES RESULTATS POUR LA SIMULATION PROSPECTIVE

24.1 Bilans énergétiques : scénarios attendus à l'horizon 2009

	Essence 2009	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	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
Performance énergétique par surface	MJ/m2		10.01	7.42				

Note : les valeurs pour le scénario prospectif 2 correspondent à une variante technologique de l'étape d'estérification pour les filières EMHV (procédé de catalyse hétérogène)

24.2 Bilans gaz à effet de serre avant combustion des scénarios attendus à l'horizon 2009

	Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	10,0	18,9	19,1		18,5	18,6
Indicateur effet de serre par kg	427	505	513		664	668

		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

L'indicateur effet de serre est calculé à partir des émissions de CO₂, CH₄ et N₂O.

Note : les valeurs pour le scénario prospectif 2 correspondent à une variante technologique de l'étape d'estérification pour les filières EMHV (procédé de catalyse hétérogène)

24.3 Bilans gaz à effet de serre des scénarios attendus à l'horizon 2009 avec hypothèse de combustion totale

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

	Essence	Ethanol Blé	Ethanol Betterave	MTBE	ETBE Blé	ETBE Betterave
Indicateur effet de serre par MJ	85,5	18,9	19,1		65,1	65,2
Indicateur effet de serre par kg	3 635	505	513		2 336	2 339

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

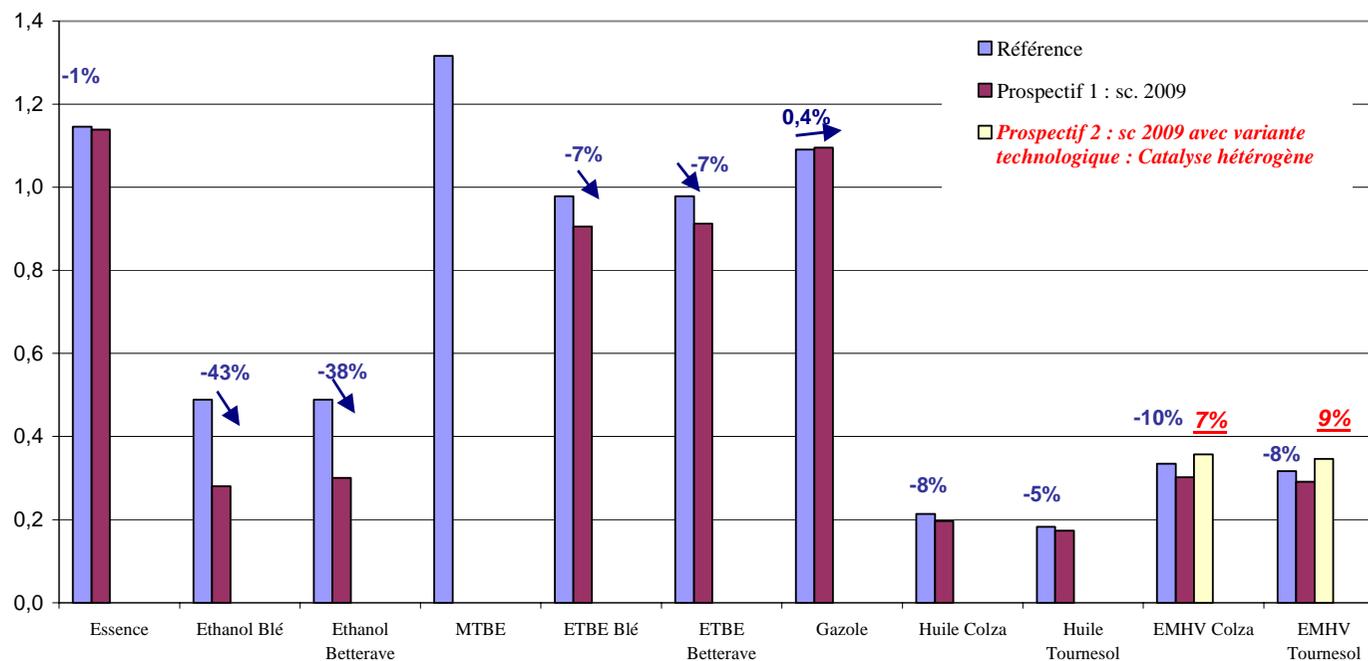
		Gazole	Huile Colza	Huile Tournesol	EMHV Colza	EMHV Tournesol	EMHV Colza prosp 2	EMHV Tournesol prosp 2
Indicateur effet de serre par MJ	g eq.CO2/MJ	80.7	16.2	12.4	21.1	18.1	24.6	21.7
Indicateur effet de serre par kg	g eq.CO2/kg	3 454	601	468	787	671	922	805

On remarquera que dans l'hypothèse de combustion totale 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).

25 INTERPRETATION DES RESULTATS POUR LA SIMULATION PROSPECTIVE

25.1 Bilans énergétiques

Energie non renouvelable mobilisée
en MJ par MJ de produit restitué



La comparaison des résultats des scénarios prospectifs par rapport aux scénarios de référence montre qu'il y a un large progrès attendu du bilan énergétique pour les filières éthanol de blé et de betterave (amélioration du bilan de l'éthanol de blé de 43% et du bilan de l'éthanol de betterave de 31%).

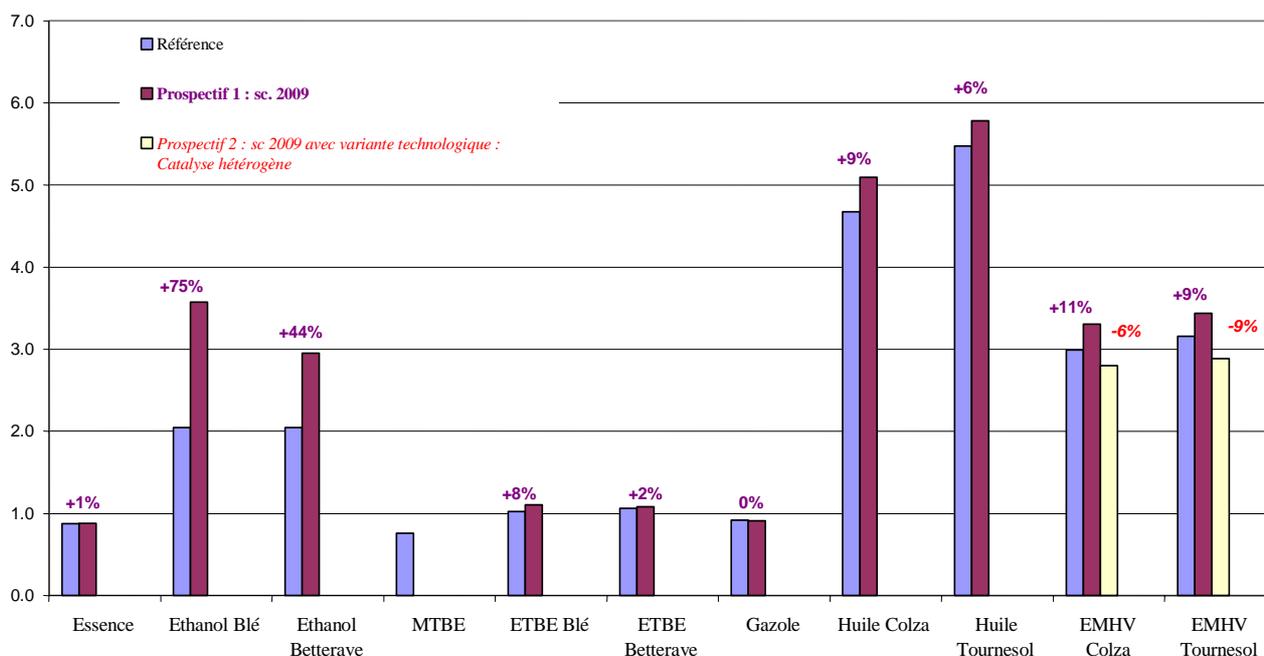
Dans une moindre mesure, pour les filières ETBE de blé et betterave ainsi que pour les filières huile et EMHV de colza et tournesol, un progrès de l'ordre de 5 à 10% est envisagé. Au contraire, si le procédé de catalyse hétérogène se développe, le bilan énergétique du produit EMHV sera allourdi de 8%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

En conséquence, le ratio énergie restituée / énergie non renouvelable mobilisée est susceptible de s'améliorer pour les filières biocarburants.

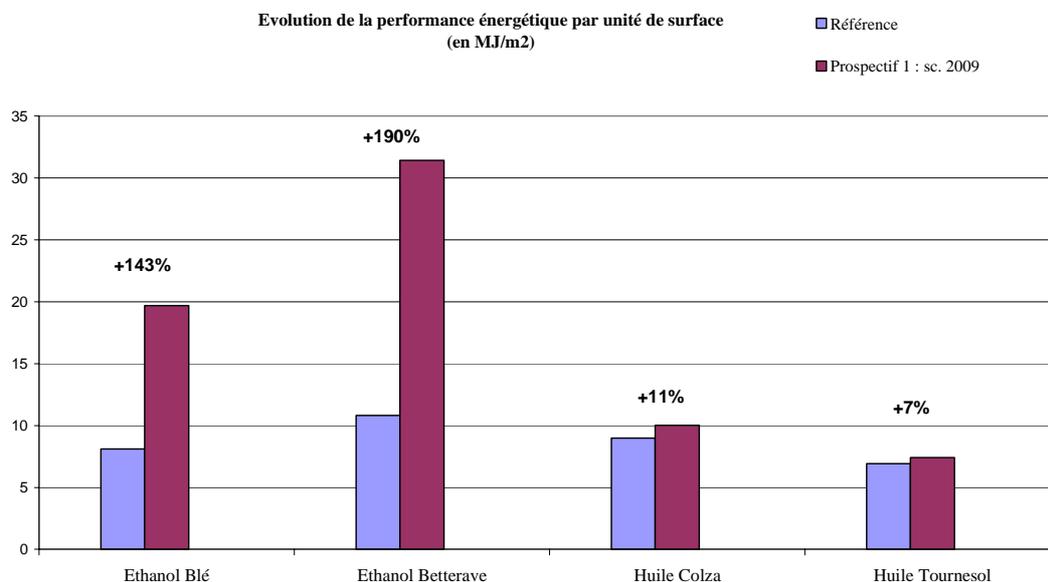
En revanche, les simulations faites sur les carburants classiques ne présentent aucune évolution significative du bilan.

Le graphique ci-dessous traduit l'indicateur : énergie disponible / énergie non renouvelable mobilisée.

Ratio Energie restituée / énergie non renouvelable mobilisée

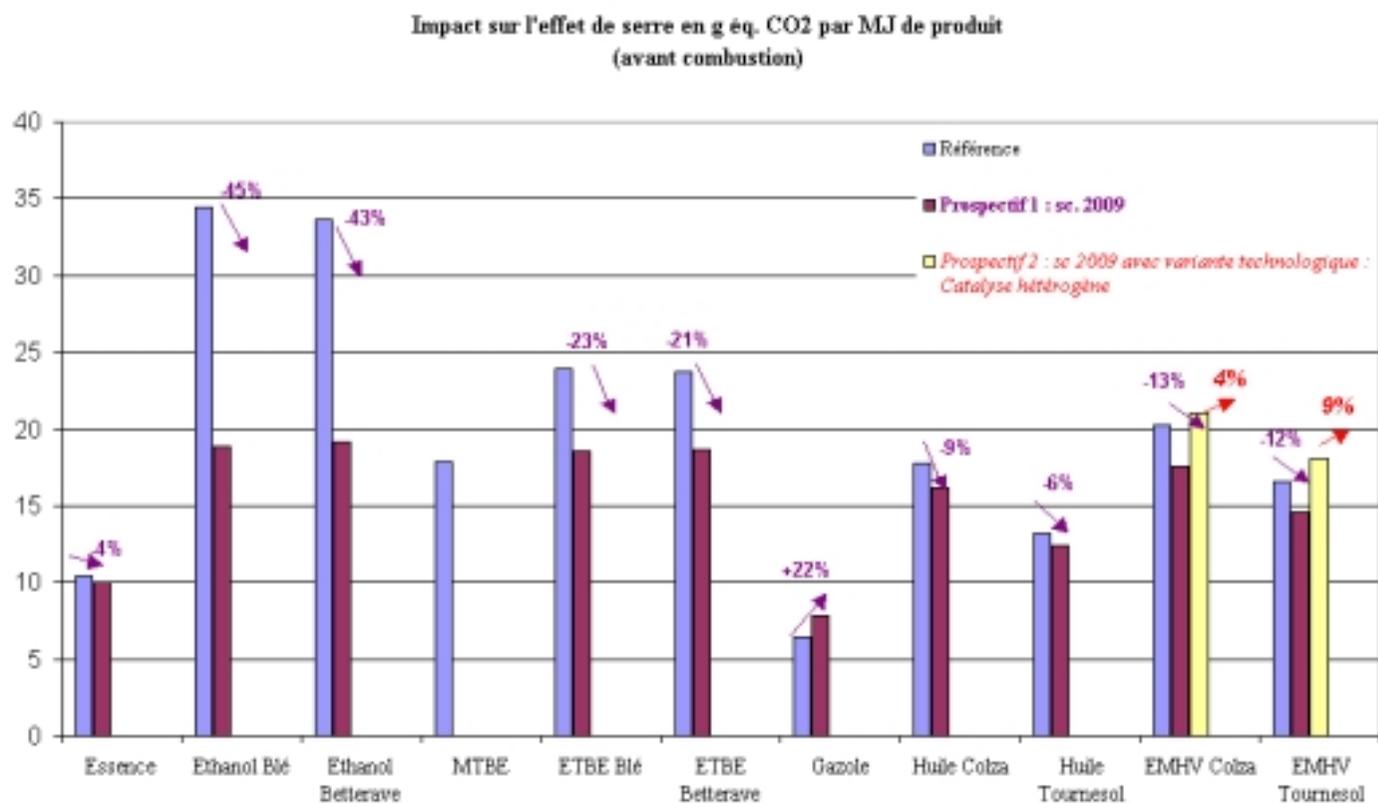


Le graphique ci-dessous traduit l'évolution prévisible de la performance énergétique par unité de surface pour les quatre filières biocarburants : éthanol de blé et betterave, huile de colza et tournesol, d'après les résultats des scénarios prospectifs.



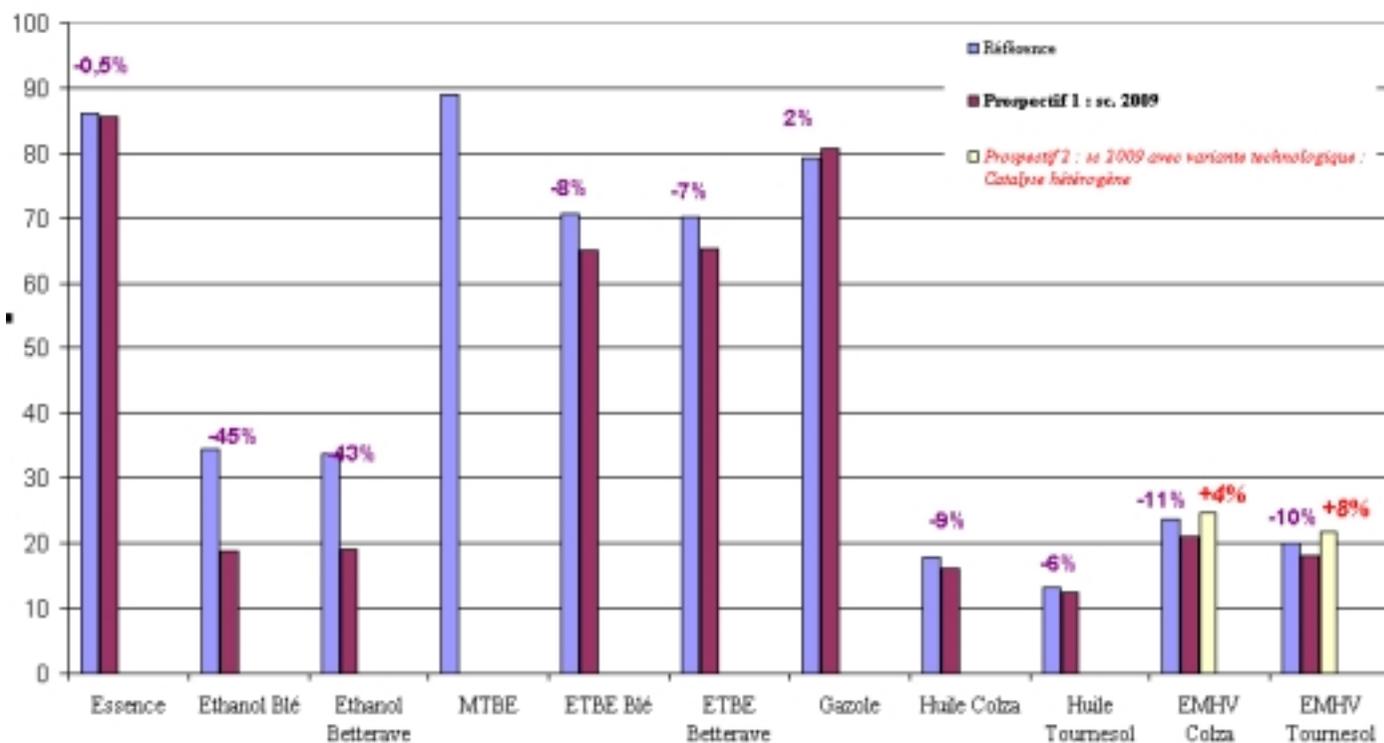
L'évolution attendue des performances des filières blé et betterave par unité de surface est supérieure à 140% alors que pour les filières colza et tournesol, l'évolution prévisible est d'environ 11% pour le colza et 7% pour le tournesol. Ces différences s'expliquent principalement par l'importante amélioration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

25.2 Bilans gaz à effet de serre (avant combustion)



25.3 Bilans gaz à effet de serre avec hypothèse de combustion totale

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



De la même façon que pour le bilan énergétique, la comparaison des résultats des scénarios prospectifs par rapport aux scénarios de référence montre qu'il y a un progrès attendu du bilan gaz à effet de serre pour l'ensemble des filières biocarburants notamment :

- pour les filières éthanol de blé et de betterave (amélioration des bilans de l'éthanol de blé et de betterave supérieure à 40%) ;
- pour les filières ETBE de blé et betterave (amélioration de l'ordre de 20%) ;
- pour les filières EMHV de colza et de tournesol (amélioration de l'ordre de 12%) ;
- pour les filières huile de colza et de tournesol et de l'EMHV (amélioration de 6% pour l'huile de tournesol et de 9% pour le colza du bilan gaz à effet de serre).

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 alourdi.

Concernant les carburants classiques, alors que le bilan de l'essence se voit très légèrement amélioré (environ 4%), les résultats montrent une évolution plus importante du bilan gaz à effet de serre du gazole, qui est alourdi d'environ 22% à l'horizon 2009.