

ADEME



DIREM



Elaboration des bilans énergétiques des filères de production de biocarburants

Synthèse des données disponibles

Février 2002

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	6
2	MÉTHODOLOGIE DE RÉALISATION DE LA SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES	7
2.1	Identification des sources de données	7
2.2	Méthodologie d'analyse des données	8
3	SYNTHÈSE ISSUE DE L'ANALYSE DES DONNÉES DISPONIBLES	9
3.1	Bilan sur les choix méthodologiques	9
3.1.1	Modélisation du carbone biomasse	9
3.1.2	Prise en compte des co-produits et des sous produits	11
3.1.3	Identification des indicateurs de performance énergétique homogènes entre filières	15
3.1.4	Prise en compte de l'énergie renouvelable	16
3.2	Identification des besoins de collecte des données ou d'actualisation	16
3.2.1	Amont agricole des filières de biocarburants	16
3.2.2	Filière éthanol et ETBE de betterave	17
3.2.3	Filière éthanol et ETBE de blé	17
3.2.4	Filière huile et EMHV de colza	17
3.2.5	Filière huile et EMHV de tournesol	17
4	MODÉLISATION DES INTRANTS AGRICOLES ET DES ÉMISSIONS À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE	18
4.1	Référentiel pour le calcul des bilans énergétiques – Productions agricoles	18
4.1.1	Présentation synthétique de l'étude et définitions	18
4.1.2	Bilan énergétique de la fertilisation minérale	19
4.1.3	Bilan énergétique de la protection phytosanitaire	20
4.1.4	Bilan énergétique des transports avec tracteur, de la mécanisation et des travaux culturaux	21
4.1.5	Choix méthodologiques pour la prise en compte de l'inter culture	22
4.1.6	Valeurs énergétiques pour certains produits et coproduits agricoles et choix d'allocation	23
4.2	Autres données disponibles	25
4.2.1	Valeurs énergétique des principaux combustibles fossiles	25
4.2.2	Prise en compte des émissions de N ₂ O en agriculture	25
4.2.3	Prise en compte des travaux sur les parcelles	26
4.2.4	Valeurs énergétiques pour les engrais et produits phytosanitaires	26
4.2.5	Valeurs énergétiques de produits agricoles	27
5	PRODUCTION D'ÉTHANOL ET D'ETBE À PARTIR DE BETTERAVES	27
5.1	Ecobilan de l'ETBE de betteraves – Comparaison avec le MTBE - 1996	27
5.1.1	Présentation synthétique de l'étude	27
5.1.2	Description de la filière et des étapes prises en compte dans l'étude	29
5.1.3	Sources des données	29
5.1.4	Choix méthodologiques	31
5.1.5	Valeurs énergétiques et gaz à effet de serre pour chacune des étapes	33
5.1.6	Principales conclusions de l'étude	35

5.2	Autres sources de données concernant la production d'éthanol	36
5.2.1	Argonne National Laboratory – Modèle de calcul du bilan énergétique et des émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie des carburants	36
5.2.2	U.S. Department of Agriculture : estimation du bilan énergétique de la filière éthanol (1995)	37
5.3	Bilan des données disponibles et des actualisations à envisager sur la filière éthanol et ETBE de betterave	37
6	PRODUCTION D'ÉTHANOL ET D'ETBE À PARTIR DE BLÉ	38
6.1	Description de la filière et des coproduits	38
6.2	Bilan des données disponibles et des besoins de collecte	39
6.2.1	Production agricole du blé	39
6.2.2	Production de glucose à partir de blé	40
6.2.3	Production d'éthanol à partir de glucose	40
6.2.4	Production d'ETBE à partir d'éthanol de blé	40
6.2.5	Les transports	41
7	PRODUCTION D'HUILE ET D'EMHV À PARTIR DE COLZA	41
7.1	Analyse du cycle de vie du diester, évaluation comparée des filières gazole et diester - 1993 à 1999	41
7.1.1	Présentation synthétique de l'étude	41
7.1.2	Description de la filière et des étapes prises en compte dans l'étude	42
7.1.3	Sources des données	42
7.1.4	Choix méthodologiques	43
7.1.5	Valeurs énergétiques et gaz à effet de serre pour chacune des étapes	44
7.1.6	Principales conclusions de l'étude	45
7.2	Autres sources de données	46
7.2.1	Argonne National Laboratory – Transportation Fuel Model (Greet Model)	46
7.3	Bilan des données disponibles et actualisations à envisager sur la filière huile et EMHV de colza	47
8	PRODUCTION D'HUILE ET D'EMHV À PARTIR DE TOURNESOL	47
8.1	Aspects énergétiques de l'ester de méthyle de tournesol - 1995	47
8.1.1	Présentation synthétique de l'étude	47
	Description de la filière et des étapes prises en compte dans l'étude	48
8.1.3	Sources de données	49
8.1.4	Choix méthodologiques	49
8.1.5	Valeurs énergétiques et gaz à effet de serre pour chacune des étapes	49
8.1.6	Principales conclusions de l'étude	53
8.1.7	Améliorations	53
9	PRODUCTION DE MTBE	54
10	PRODUCTION DES CARBURANTS CLASSIQUES : ESSENCE ET GAZOLE.	56
10.1	Données bibliographiques ETH Zürich, 1996	56
10.2	Argonne National Laboratory – Transportation Fuel Model (Greet Model)	57
10.2.1	Présentation de l'outil	57

10.2.2	Bilan énergétique des carburants classiques	57
10.3 Présentation des données proposées et calculées par l'IFP pour la production d'essence et de diesel en France		58
10.3.1	La production	58
10.3.2	Transport	59
10.3.3	3. Le raffinage	61
 11 GLOSSAIRE		 64

TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs de références pour les ressources fossiles retenues dans le référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole	19
Tableau 2 : Energie primaire totale de différents engrais – Issue du " référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole"	20
Tableau 3 : Energie primaire totale de quelques matières actives phytosanitaires – Issu du " référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole"	21
Tableau 4 : Règles d'imputation les plus courantes pour la comptabilisation de la gestion de l'inter culture	23
Tableau 5 : Règle d'imputation : rapports massiques entre produits et co-produits.....	24
Tableau 6 : composition des co-produits enfouis	24
Tableau 7 : valeur énergétique retenue pour les produits agricoles.....	25
Tableau 8 : Valeurs de référence utilisées dans l'Ecobilan de l'ETBE de betteraves.....	28
Tableau 9 : Règles d'imputation prises en compte dans l'Ecobilan de l'ETBE de betteraves	32
Tableau 10 : Règles d'imputation pour les co-produits de la filière colza	43
Tableau 11 : Allocation des consommations d'énergie et des émissions entre produits et co-produits	46
Tableau 12 : fertilisation selon différents itinéraires techniques de production de tournesol.....	50
Tableau 13 : protection phytosanitaires selon différents itinéraires techniques de production du tournesol.....	50
Tableau 14 : consommations de gazole liées au passage d'outil pour différents itinéraires techniques de production du tournesol	51
Tableau 15 : consommations énergétiques de la transformation des graines de tournesol en EMHV	53
Tableau 16 : Bilan de l'inventaire agrégé de la production d'un kilogramme d'Essence sans plomb (source donnée : ETH, pages 171-173 pour la phase de raffinage).....	56
Tableau 17 : Bilan de l'inventaire agrégé de la production d'un kilogramme de Gazole (source donnée : ETH, pages 171-173 pour la phase de raffinage)	57
Tableau 18 : Evaluation des volumes de gaz naturel brûlés sur champs pétroliers	59
Tableau 19 : Distance moyenne des oléoducs "on-shore" et "off-shore" des zones d'extraction jusqu'au port pétrolier du pays exportateur.	60
Tableau 20 : Evaluation des distances moyennes de transports pour le pétrole brut importé en France	60
Tableau 21 : Evaluation des distances moyennes de transports du port pétrolier à la raffinerie	61
Tableau 22 : Principales caractéristiques des pétroles utilisés dans le modèle de programmation linéaire de l'IFP	62
Tableau 23 : Estimation des distances entre la raffinerie et les dépôts régionaux.	63

FIGURES

Figure 1 : Frontières du système pour le bilan énergétique de produits agricoles.....	18
Figure 2 : Filière de production de l'éthanol de betterave et de l'ETBE	29
Figure 3 : <u>A priori</u> , filière de production de l'éthanol et de l'ETBE de blé	39
Figure 4 : Filière de production de l'huile de colza et de l'EMHV	42
Figure 5 : Filière de production de l'huile de tournesol et de l'EMHV	48
Figure 6 : production de pétrole : évolution du volume de gaz brûlé en % de la production brute de gaz....	58

1 INTRODUCTION

Le contexte européen en matière de développement des énergies renouvelables et le projet de Directive européenne 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 en terme d'indépendance énergétique.

Dans ce contexte, la Direction de l'Agriculture et des Bioénergies de l'ADEME d'une part, et la Direction des Ressources Énergétiques et Minérales (DIREM) du Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie d'autre part se sont associés pour produire des bilans énergétiques et effet de serre, fiables et actualisés, des principaux biocarburants produits et utilisés en France (éthanol et ETBE de blé et de betterave, huile et EMHV de tournesol et de colza) ainsi que des filières pétrolières classiques (essence et diesel).

Ces bilans seront produits en suivant la méthodologie normalisée des Analyses de Cycles de Vie (ACV)¹, limitée cependant au suivi de certains flux et indicateurs.

Ce travail a été confié à la société Ecobilan, membre du Département Développement Durable du cabinet PricewaterhouseCoopers. 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'Énergie.

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 permettent d'alimenter les travaux pour l'étude ADEME-DIREM. Cependant, les résultats de ces études sont plus ou moins récents et ont été produits, de manière indépendante, sur la base de choix méthodologiques et d'hypothèses qui peuvent être différents. Il est donc important d'actualiser et de compléter ces données, mais aussi d'assurer des choix méthodologiques comparables entre filières, et cela afin d'établir des bilans énergétiques homogènes. L'étude doit en effet 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, il est donc nécessaire d'effectuer un état des lieux des sources de données existantes, pouvant alimenter la réalisation de ces bilans. Cet état des lieux, présenté dans cette synthèse des données disponibles, a pour objectifs :

- 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.

¹ Série de normes ISO 14040 à 43.

A partir de cet état des lieux, le comité de pilotage, lors de la première réunion intermédiaire du 4 mars, devra se prononcer sur les choix méthodologiques qu'il souhaite retenir, ainsi que sur les besoins d'actualisation des données présentées dans cette synthèse des données bibliographiques.

Afin d'alimenter la réflexion, le chapitre 3 propose des éléments quant aux choix méthodologiques, ainsi que des propositions pour l'actualisation et la collecte des données.

Comme on le verra dans ce chapitre, la nature du travail proposé ici dépasse ce qui a été prévu suite à l'appel d'offre. Aussi, toute collecte de donnée ou actualisation supplémentaire qui serait identifiée par le comité de pilotage conduirait à exclure l'une ou l'autre de nos propositions de collecte et d'actualisation.

2 METHODOLOGIE DE REALISATION DE LA SYNTHESE DES DONNEES DISPONIBLES

2.1 Identification des sources de données

L'identification des sources de données et d'informations pouvant intéresser l'étude, et qui sont détaillées dans ce document, s'est faite en collaboration avec l'ADEME, la DIREM, mais aussi après consultation du comité de pilotage lors de la réunion de lancement.

Le comité de pilotage a ainsi choisi les études disponibles les plus pertinentes pour les besoins de la présente étude.

Les différentes sources de données analysées sont les suivantes :

- *Conformément aux préconisations de l'appel d'offre ADEME-DIREM, ainsi qu'aux éléments additionnels apportés par ces deux entités :*
 - ⇒ L'étude des références pour le calcul des bilans énergétiques des cultures, réalisée par un comité de pilotage élargi, incluant l'ADEME, en 1999;
 - ⇒ L'Analyse de Cycle de Vie de l'ester méthylique de colza, réalisée en 1993 par l'ONIDOL et actualisée en 1999;
 - ⇒ L'étude des aspects énergétiques de l'ester de méthyle de tournesol, réalisée en 1995 par le CETIOM;
 - ⇒ L'écobilan de l'ETBE de betterave en comparaison avec le MTBE, réalisée en 1996 par la CGB et le SNPAA.

- *Suite à l'initiative de propositions du comité de pilotage lors de la réunion de lancement :*
 - ⇒ La modélisation de "l'Argonne National Laboratory – Transportation Fuel Model (Greet Model)", aux Etats-Unis;
 - ⇒ La recherche de données sur le MTBE, en particulier à partir de l'étude de 1996 de comparaison avec l'ETBE de betteraves, réalisée par la CGB et le SNPAA;
 - ⇒ Pour les filières essence et diesel, la présentation de données bibliographiques couramment utilisées en ACV, issues d'ETHZ (Zurich) (« ökoinventaire von Energiesystemen »).

- *Sur l'initiative d'Ecobilan (voir paragraphe 4.2):*
 - ⇒ des données issues de sources bibliographiques, utilisées en ACV pour les produits agricoles ou les ressources énergétiques :
 - des valeurs énergétiques de combustibles fossiles;

- des données sur la prise en compte du N₂O en agriculture, la modélisation des travaux sur les parcelles agricoles;
- des sources de données pour les bilans énergétiques de production des engrais et des produits phytosanitaires.

La présentation de ces données sur l'initiative d'Ecobilan a pour objectif de fournir des données additionnelles en vue d'alimenter l'étude ou de fournir des éléments de comparaison par rapport à d'autres sources de données étudiées.

- ⇒ les sources de données qui seront proposées par l'IFP pour les bilans énergétique et gaz à effet de serre de l'essence et du diesel produits en France, dans le cadre de la présente étude.

Il est important de souligner que l'étude mise à disposition par PSA sur les impacts environnementaux des filières énergétiques automobiles n'est pas présentée de façon détaillée dans cette synthèse. En effet, cette étude reprend, pour les filières essence et diesel les données ETHZ, et pour la filière EMHV les données ONIDOL, qui sont par ailleurs détaillées dans cette synthèse.

2.2 Méthodologie d'analyse des données

Pour chacune des sources de données identifiées, l'analyse des documents a poursuivi les objectifs suivants:

- identification des choix méthodologiques ou de présentation retenus dans chaque étude et pouvant influencer les résultats présentés :
 - choix d'imputation pour les coproduits ou les sous produits;
 - modélisation du carbone biomasse;
 - mode de présentation de l'indicateur de performance énergétique².
- identification des sources primaires de données, permettant d'évaluer le niveau de confiance dans la source, et son adéquation par rapport au cas d'étude (pouvant être estimée par exemple grâce à la représentativité géographique de la source et à son âge);
- identification des données de référence utilisées dans l'étude (PCI...);
- présentation des données disponibles dans ces études, et qui pourraient intéresser l'étude ADEME-DIREM (en particulier en matière de bilans énergétiques et gaz à effet de serre);
- pour les filières biocarburants, identification des étapes influençant les résultats de la filière, afin d'appuyer les besoins d'actualisation sur ces étapes.

Les résultats de cette analyse des données sont présentés dans les paragraphes 4 et suivants. Les études sont regroupées par filière, à l'exception de l'amont agricole qui fait l'objet d'une présentation détaillée. Le document présente donc les différentes études selon le découpage suivant :

- la modélisation de l'agriculture et de la production de ses intrants;
- la production d'éthanol et d'ETBE à partir de betteraves;
- la production d'éthanol et d'ETBE à partir de blé;

² Par souci de simplification, un ratio unique de présentation des résultats pour les biocarburants a été retenu dans cette synthèse : Energie mise à disposition par le combustible / Energie primaire totale (à l'exclusion du combustible) nécessaire à sa mise à disposition. Le choix d'un ratio de présentation des résultats dans l'étude ADEME DIREM restera libre à la décision du comité de pilotage lors de la réunion intermédiaire.

- la production d'huile et d'EMHV de colza;
- la production d'huile et d'EMHV de tournesol;
- la production de MTBE;
- la production d'essence et de diesel.

Le paragraphe 3 correspond à une synthèse de l'analyse des données disponibles, qu'il paraît préférable de placer en préalable, en laissant les paragraphes suivants présenter le détail des données disponibles pour chacune des filières et chacune des études.

3 SYNTHÈSE ISSUE DE L'ANALYSE DES DONNÉES DISPONIBLES

L'analyse des données disponibles poursuit un double objectif :

- **harmoniser** les données existantes : il s'agit pour cela de déterminer des choix méthodologiques pertinents et cohérents entre les différentes filières. Le paragraphe 3.1 effectue une synthèse des choix méthodologiques retenus dans les différentes études, et propose des règles nécessitant de recueillir l'aval du comité de pilotage au cours de la prochaine réunion intermédiaire.
- **actualiser** certaines étapes et collecter des données. Ces choix devront être validés par le comité de pilotage. Le paragraphe 3.2 propose cependant des étapes sur lesquelles une actualisation semblerait justifiée.

3.1 Bilan sur les choix méthodologiques

3.1.1 Modélisation du carbone biomasse

Le choix de la modélisation du carbone fixé par la biomasse doit être homogène entre les différentes filières.

Pour mémoire, dans l'étude ONIDOL, la modélisation du CO₂ tient compte du prélèvement dans l'atmosphère de CO₂ biomasse lors de la croissance du colza. En contrepartie, les émissions de CO₂, lors de la combustion de l'EMHV sont divisées entre une part d'émission fossile (correspondant à la part non issue de produits agricoles), et une part biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre. En revanche, dans l'étude de la CGB SNPAA, la modélisation tient compte du prélèvement dans l'atmosphère de CO₂ lors de la croissance des betteraves, tandis que les émissions, qu'elles soient issues de combustibles fossiles ou bien de biomasse sont comptabilisées sans distinction. La notion de carbone biomasse n'est pas explicite, mais la modélisation permet d'en tenir compte.

La règle qui sera retenue dans l'étude ADEME-DIREM doit correspondre aux pratiques validées en matière de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre. Voici donc la règle que nous proposons :

1. Suivi des émissions de C biomasse sous forme de CO₂ au sein des filières de production des biocarburants. 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.
2. Les émissions de méthane issues de la biomasse seront également comptabilisées de façon individualisées dans l'étude, sous forme de CH₄ biomasse. En revanche, contrairement au CO₂ biomasse, ces émissions de CH₄ biomasse contribueront en partie à l'effet de serre.

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), et de la différence relative de contenu en carbone de chacune

de ces deux molécules, il serait erroné de considérer que le carbone issu de la biomasse et émis sous forme de CH₄ ne contribue pas à l'effet de serre. Il y contribue en partie.

3. Lors de la croissance des plantes, la mobilisation du CO₂ sous forme de C biomasse dans les plantes ne fera pas l'objet d'une comptabilisation spécifique. En effet, sauf si les professionnels des filières de production des biocarburants arrivent à justifier que cette production correspond à un prélèvement durable de CO₂ dans l'atmosphère (de type "puits de carbone"), il n'est pas opportun de comptabiliser ce prélèvement en tant que tel.

Cette règle, si elle est acceptée par le comité de pilotage, devra être édictée simultanément lors de la publication des résultats de l'étude. En effet, la prise en compte des émissions de CO₂ biomasse lors de la combustion des biocarburants devra suivre ce choix méthodologique retenu dans l'étude.

3.1.2 Prise en compte des co-produits et des sous produits

Le tableau ci-dessous résume, pour chacune des études, les règles de prise en compte des co-produits et sous produits.

Source des données	Etapes	Coproducts ou sous-produits ou Question de méthodologie	Prise en compte de ces produits ou solution proposée	Avis Ecobilan
Référentiel pour le calcul des bilans énergétiques – Productions agricoles	Prise en compte de l'inter culture	Différentes règles en fonction des travaux effectués sur l'inter culture, et des apports en fertilisants et phytosanitaires	Les règles d'imputation suivent la logique de raison pour laquelle chaque opération est effectuée. Principalement affectées à la (aux) culture(s) suivantes.	Pertinent
	Production de blé	Paille et grain	Si paille, ou fanes ou cannes enfouies : 100% impacts évités de la fertilisation N, P, K par des engrais de synthèse Sinon, imputation massique	Pertinent
	Production de betteraves	Fanes et betteraves		
	Production de colza	Pailles et graines		
	Production de tournesol	Cannes et graines		
Ecobilan de l'ETBE de betterave – Etude CGB SNPAA	Culture de betteraves	Fanes	25% (part réutilisée) impacts évités de la fertilisation N par des engrais de synthèse	Adapter la règle en cohérence avec le reste : 100% impacts évités
	Lavage	Boues valorisées en engrais	26% (part réutilisée) impacts évités de la fertilisation N, P, K par des engrais de synthèse (pour la part de boues épandues, soit 50%)	Adapter la règle en cohérence avec le reste : 100% impacts évités sur les 50% épandues.
	Diffusion	Pulpes valorisées en alimentation animale	Imputation massique au pro rata du contenu en sucre Jus vert : 77%, pulpe : 23%	Pertinent
	Epuration	Ecumes valorisées en engrais	100% impacts évités de la fertilisation N, P, K par des engrais de synthèse	Pertinent
	Cristallisation	Sucre blanc cristallisé	Extension des frontières du système / prorata massique du sucre équivalents	Adapter la règle en cohérence avec le reste, la différence étant faible avec l'extension des frontières : pro rata du contenu en sucre
	Distillation	Vinasses valorisées en engrais	entre 55 et 40% (part d'éléments valorisés) impacts évités de la fertilisation N, K par des engrais de synthèse	Adapter la règle en cohérence avec le reste : 100% impacts évités
	31/01/02			11

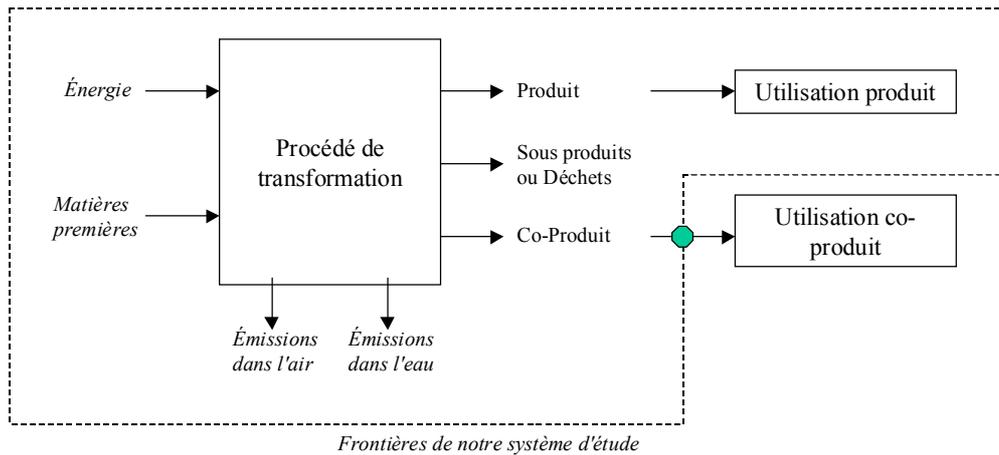
Elaboration des bilans énergétiques des filières de production de biocarburants
Synthèse des données disponibles

	Coupe isobutène	Plusieurs coupes Production de vapeur	Imputation massique des consommations d'énergie entre les différents produits pétroliers Impacts évités de production de vapeur	Pertinent
Analyse de cycle de vie du diester – Etude ONIDOL	Trituration des graines	Tourteaux	Imputation massique 45.6% huile et 54.4% tourteaux	Pertinent
	Estérification	Glycérine	Imputation massique 90.7% EMHV et 9.3% glycérine	Pertinent
Argonne National Laboratory Filière soja	Trituration	Tourteaux soja	Retient par défaut une imputation économique Propose également l'analyse de l'imputation massique ou de l'extension des frontières du système.	Allocation économique peu pertinente au regard des préconisations de l'ISO
Argonne National Laboratory Filière éthanol de maïs		Multiples co produits	L'outil propose l'analyse par imputation économique et par extension des frontières du système.	Imputation économique peu pertinente Extension des frontières parfois difficile sur certains co produits
US Department of agriculture Filière éthanol de maïs		Multiples co produits	Extension des frontières du système	Pertinent si les produits substitués sont correctement identifiés.
ETHZ	Co produits pétroliers		Imputation massique	Pertinent
Argonne National Laboratory Filières essence et diesel	Co produits pétroliers		Imputation énergétique	Pas adapté au procédé de raffinage du pétrole
IFP	Co produits pétroliers		Imputation massique	Pertinent

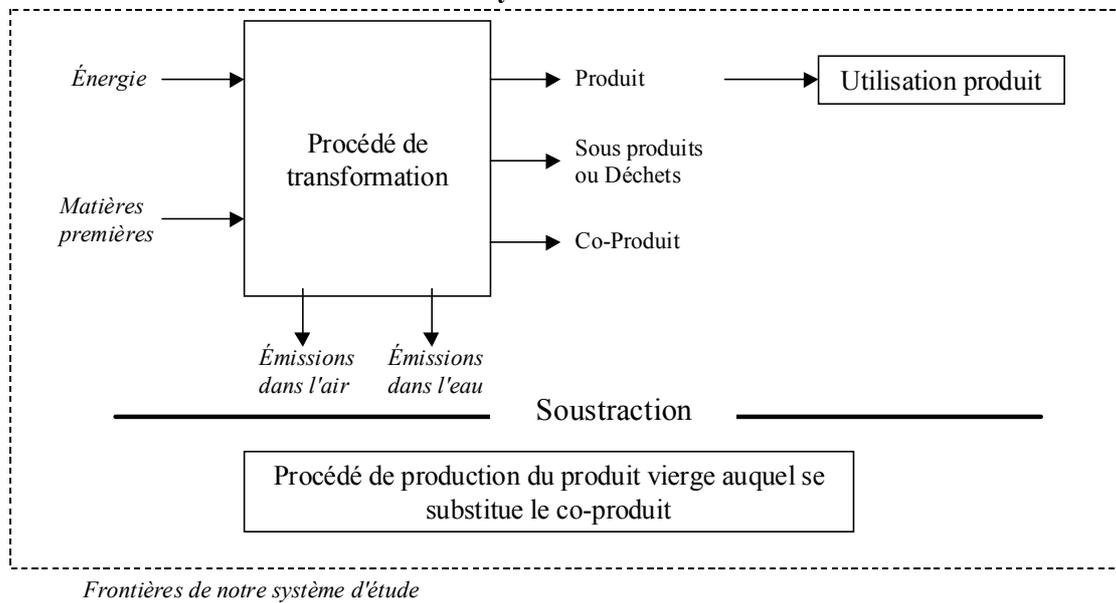
Le choix des règles d'imputation dans ce projet doit s'effectuer séparément pour chaque étape de chacune des filières, en s'interrogeant sur la meilleure règle possible en fonction du fait qu'il s'agisse ou non d'un produit fatal, mais aussi du devenir effectif du produit valorisé.

Afin d'être aussi didactique que possible, les schémas suivants présentent les frontières du système d'étude d'un procédé produisant des co-produits (tel qu'on en rencontre dans cette étude), et les différentes solutions méthodologiques pouvant être apportées, à savoir :

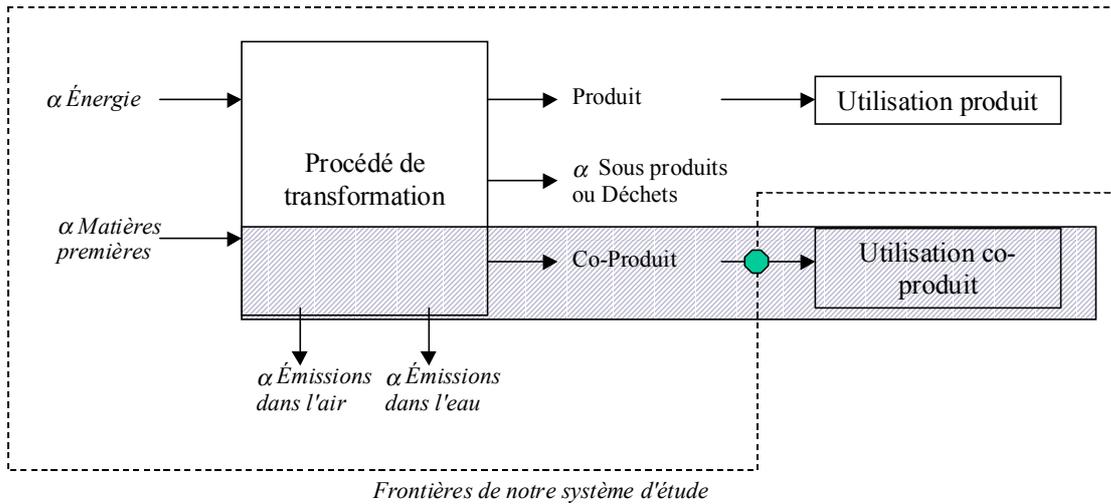
- l'extension des frontières du système
- l'allocation (ou imputation)
- l'approche par "tas de matière valorisée"



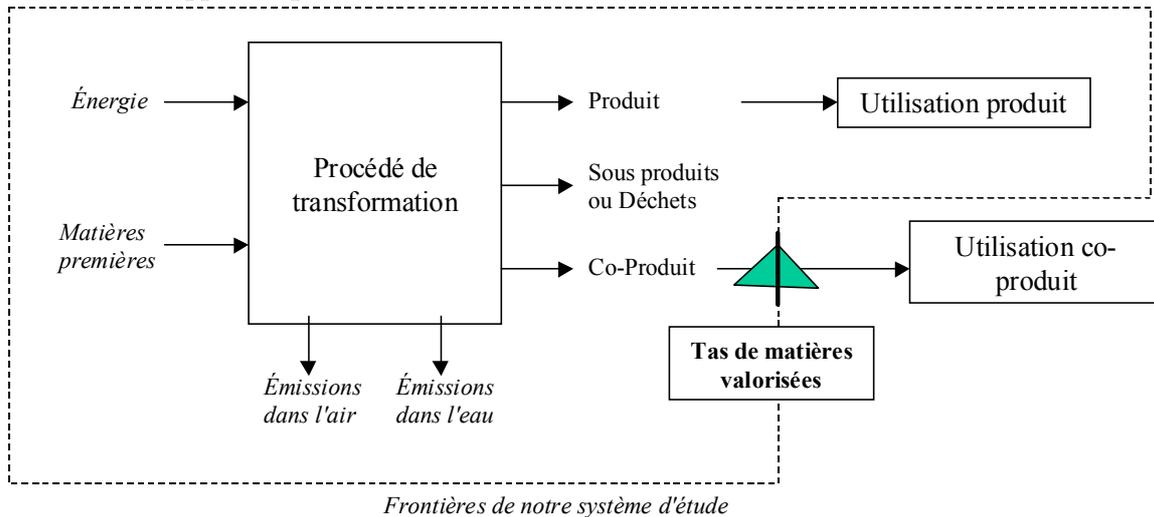
Solution a : extension des frontières du système



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



Solution c : approche par "tas de matières valorisées"



Comme cela est présenté dans d'autres études (voir paragraphes 5.2.1 et 5.2.2), les différentes règles posent chacune des difficultés spécifiques.

L'extension des frontières du système n'est pas possible lorsqu'on ne peut pas identifier le produit vierge qui serait substitué, parce que ce produit vierge n'existe plus. Qui plus est, cette méthode pose la difficulté de "polluer" l'analyse, en introduisant des contributions issues de filières complètement indépendantes de l'étude, nous écartant des objectifs de l'étude.

L'imputation économique n'est pas la solution préconisée par l'ISO, en raison des fortes variations potentielles des résultats de l'inventaire dues au choix de ce type de critère. L'imputation sur une base "physique", par exemple massique ou énergétique, est préférée par l'ISO.

La définition de la règle doit bien entendu s'effectuer lors de l'analyse de chaque procédé, afin de valider sa pertinence.

Dans les études analysées, la règle d'imputation retenue est une règle d'imputation massique³. Pour les filières huiles et les filières pétrolières, l'imputation s'effectue à la masse des produits sortants. Pour la filière betterave, l'imputation s'effectue à la masse du contenu en sucre des produits. C'est une règle qui paraît pertinente.

Le comité de pilotage pourrait retenir, dans le cadre des simulations envisagées, d'étudier l'approche par "tas de matières valorisées" (voir schéma précédent). L'objectif serait alors de valider que les résultats initiaux sont indépendants de la méthodologie choisie.

Ce choix doit être discuté par le comité de pilotage.

3.1.3 Identification des indicateurs de performance énergétique homogènes entre filières

Le choix des indicateurs de performance énergétique qui seront produits à l'issue de l'étude doivent d'ores et déjà être envisagés par le comité de pilotage. En effet, ils conditionnent le type d'information qui devra être recherché pour chacune des étapes de chacune des filières.

Plusieurs types d'indicateurs peuvent être proposés. Souvent, les indicateurs identifiés dans la bibliographie retiennent globalement :

$$\frac{\text{Energie restituée}}{\text{Energie consommée}}$$

Cependant, il faut être précis sur le contenu du numérateur et du dénominateur :

- l'énergie restituée correspond-elle au seul produit de l'étude ? Ou bien inclure-t-elle l'ensemble des produits et des co-produits ?
- l'énergie consommée correspond-elle à l'ensemble de l'énergie consommée au sein de la filière, ou bien intègre-t-elle une imputation des consommations énergétiques au seul produit étudié ?
- l'énergie consommée correspond-elle à de l'énergie primaire totale, ou bien à de l'énergie non renouvelable ?

Voici certains des indicateurs identifiés dans la bibliographie, et leurs intérêts respectifs.

N°1:

$$\frac{\text{Energie restituée par le seul carburant}}{\text{Energie non renouvelable pour les étapes de production de la filière (co-produits inclus)}}$$

Cet indicateur adopte une approche conservatrice.

N°2 :

$$\frac{\text{Energie restituée par le seul carburant}}{\text{Energie non renouvelable pour les étapes de production imputées au seul produit}}$$

³ A l'exception de l'Argonne National Laboratory

Cet indicateur intègre les règles d'imputation.

N°3 :

Energie restituée par le carburant et ses co-produits

Energie non renouvelable pour les étapes de production de la filière

Cet indicateur correspond à un indicateur d'évaluation de la filière et nécessite de collecter des données validées sur les co-produits.

N°4 :

Un autre indicateur qui pourrait être intéressant dans le cadre de l'étude, en complément de l'un ou l'autre pré-cité, correspond un indicateur traduisant la quantité d'énergie restituée par m² cultivé. Cet indicateur permettrait de traduire facilement le potentiel de chacune des filières de production de biocarburants. Il est possible qu'une filière, moins performante qu'une autre en terme de ratio de restitution d'énergie tel que pré-cité, puisse être plus performante en terme d'énergie au m², ce qui modifie également la perspective de réflexion dans le cadre du développement des biocarburants en France.

Cet indicateur aurait la forme suivante :

Indicateur N°1,2 ou 3

M² cultivés

Il appartiendra au comité de pilotage de définir le ou les indicateurs qu'il souhaite retenir.

3.1.4 Prise en compte de l'énergie renouvelable

Comme cela a été retenu dans l'étude sur les référentiels pour le calcul des bilans énergétiques, au niveau des parcelles l'énergie renouvelable de type solaire, l'énergie éolienne, les précipitations, l'énergie contenue dans le sol et celle directement apportée par le travail de l'homme ne seront pas comptabilisées en tant qu'énergie consommée dans l'étude.

En revanche, le suivi énergétique des filières intégrera l'énergie renouvelable contenue dans les produits agricoles transformés en biocarburants (correspondant à la valeur énergétique massique des produits), ou bien dans les ressources énergétiques mobilisées (part d'énergie renouvelable d'environ 15% dans l'électricité française).

3.2 Identification des besoins de collecte des données ou d'actualisation

En fonction des informations rassemblées dans cette synthèse des données disponibles, ce paragraphe constitue notre proposition pour la collecte complémentaire ou l'actualisation des données disponibles pour les différentes filières.

3.2.1 Amont agricole des filières de biocarburants

L'étude des "référentiels pour le calcul des bilans énergétiques pour les productions agricoles" fournit le cadre principal de données sur lequel l'étude s'appuiera.

Ce référentiel se limitant au suivi des indicateurs énergétiques, un travail important de correspondance de ces énergies en terme de gaz à effet de serre devra être effectué.

En complément, Ecobilan évaluera les émissions de N₂O liées à l'utilisation d'engrais de synthèse N sur les parcelles conformément à la règle proposée par l'IPCC (voir paragraphe 4.2.2).

De plus, l'utilisation du référentiel pré-cité nécessite de redéfinir précisément les itinéraires techniques de production agricole pour chacune des 4 filières étudiées. Ce travail devra être effectué en coopération avec les instituts techniques compétents, qui décriront, au moyen d'un questionnaire qu'Ecobilan leur fournira, les pratiques culturales de chacune des filières.

3.2.2 Filière éthanol et ETBE de betterave

Comme cela est présenté au paragraphe 5.3, pour réaliser l'actualisation des données de production d'éthanol, en particulier pour l'étape de distillation de l'éthanol, Ecobilan collectera les données sur un site représentatif de la production actuelle ou à venir.

Cette collecte de données nécessite d'impliquer un industriel partenaire acceptant de recevoir la visite d'Ecobilan.

L'étape d'éthérification ne fera pas l'objet d'une actualisation, cependant les données relatives à la production de la coupe isobutène méritent d'être validées par un partenaire.

Enfin, les distances et les modes de transport spécifiques de la filière éthanol de betterave devront être actualisés en accord avec le comité de pilotage, sur la base de ce qui est décrit dans le chapitre 5.1.5, chaque distance spécifique étant validée par le(s) partenaire(s) compétent(s).

3.2.3 Filière éthanol et ETBE de blé

La production de glucose à partir de blé, sa fermentation et sa distillation doivent faire l'objet d'une collecte de données, par Ecobilan, chez l'un des partenaires du projet.

Un site représentatif et un industriel partenaire doivent être identifiés.

L'étape d'éthérification sera reprise à l'identique de la filière betterave.

Les distances et les modes de transport spécifiques de la filière éthanol de blé devront être définis en accord avec le comité de pilotage, sur la base d'une proposition d'Ecobilan suite à la visite du site.

3.2.4 Filière huile et EMHV de colza

Comme cela est présenté au paragraphe 7.3, l'actualisation par Ecobilan des données de production d'huile de colza portera principalement sur la définition des scénarios de transport, et la validation de certaines hypothèses (valorisation des boues, exclusion de certains consommables), et sera réalisée en collaboration avec l'ONIDOL.

Suivant ce que décide le comité de pilotage, une collecte de données sur un site représentatif de la production actuelle ou à venir pourrait également être envisagée. Dans ce cas, un site représentatif et un industriel partenaire doivent être identifiés.

3.2.5 Filière huile et EMHV de tournesol

Cette filière sera décrite en parallèle avec la filière colza, en tenant compte des rendements spécifiques de l'étape de trituration.

Aucune collecte de données n'est prévue.

Des travaux importants d'actualisation et de validation des données de l'étude CETIOM devront cependant être effectués par Ecobilan (voir paragraphe 8.1.7).

4 MODELISATION DES INTRANTS AGRICOLES ET DES EMISSIONS A L'ECHELLE DE LA PARCELLE

4.1 Référentiel pour le calcul des bilans énergétiques – Productions agricoles

4.1.1 Présentation synthétique de l'étude et définitions

Cette étude a été 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.

Les informations présentées ci-après sont issues du projet de brochure en cours de finalisation.

L'étude a pour objectif de définir des méthodes et fournir certaines valeurs permettant d'effectuer des bilans énergétiques de produits agricoles. Par bilan énergétique, on entend l'estimation de la différence entre les sortants et les intrants énergétiques d'un système agricole.

Le contenu énergétique des **intrants agricoles** englobe 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 phase de transport jusqu'à la ferme).

Le contenu énergétique des **produits agricoles sortants** correspond à la prise en compte de l'énergie dont on peut disposer par les produits et co-produits issus de la culture (ex : énergie brute des grains)

Le bilan énergétique s'effectue à l'échelle d'un système d'étude qui correspond au procédé agricole de production d'une culture, **à l'échelle de la parcelle**. La période étudiée correspond à une **campagne de production**.

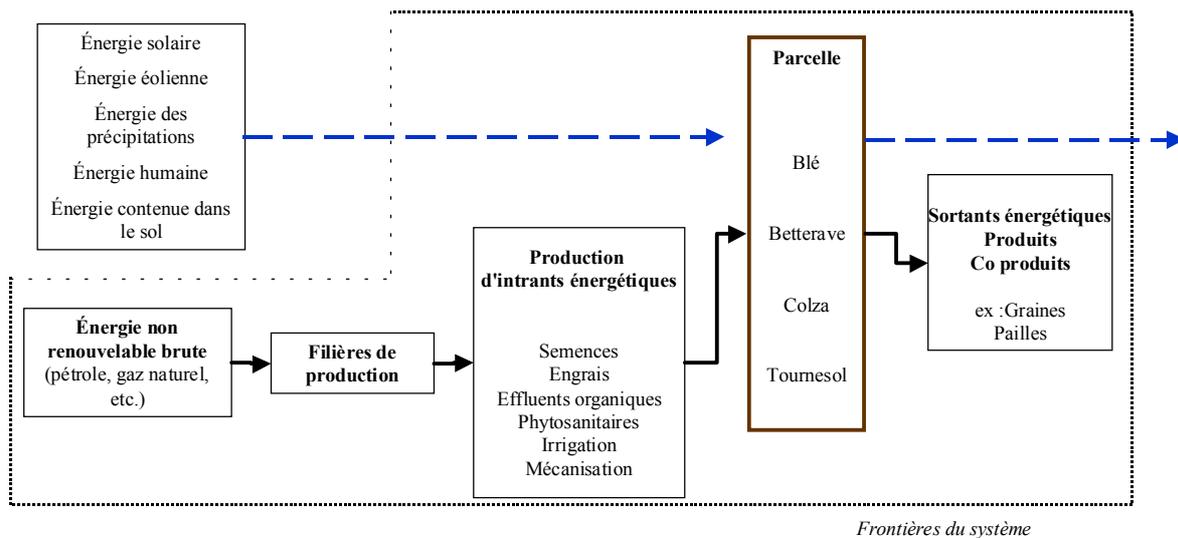


Figure 1 : Frontières du système pour le bilan énergétique de produits agricoles

Comme cela est suggéré sur le schéma, 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.

Concernant les énergies non renouvelables, les valeurs de référence retenues dans l'étude pour l'estimation de l'énergie primaire⁴ à partir des principales sources de consommations sont résumées dans le tableau ci-après :

	Energie primaire totale (MJ)	Source
Charbon (/kg)	32.3	Ademe 1997
Coke de pétrole (/kg)	36.2	Guibet 1997
GPL (/kg)	50.8	Guibet 1997
Fuel lourd (/kg)	45.2	Guibet 1997
Fuel domestique (/kg)	47.5	Guibet 1997
Gaz naturel (/kWh PCS)	3.6	Guibet 1997
Vapeur (/kg)	3.0	Sessi 1997
Electricité (/kWh)	9.5	Observatoire énergie et EDF
Gazole (/kg)	48.1	Guibet 1997

Tableau 1 : Valeurs de références pour les ressources fossiles retenues dans le référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole

4.1.2 Bilan énergétique de la fertilisation minérale

Les données du référentiel sont issues de la bibliographie. (Gaillard⁵ 1997, et ADEME 1997 pour le soufre).

Le tableau ci-après fournit les contenus en énergie primaire pour la mise à disposition de différents engrais. Ces valeurs n'intègrent pas la distribution de ces produits manufacturés. Les valeurs sont fournies par unité d'azote N, de phosphate sous forme P₂O₅, de potassium sous forme K₂O, de chaux sous forme CaO, et de soufre sous forme SO₃.

Leur utilisation implique donc de traduire les apports d'engrais sur parcelles en kg équivalent N, P₂O₅, K₂O, CaO ou SO₃.

⁴ L'énergie primaire intégrant l'énergie disponible dans le produit mis à disposition (PCI du charbon, gaz...) additionnée de l'ensemble des consommations énergétiques ayant été nécessaires à cette mise à disposition (procédés de transformation, transports...)

⁵ 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. Compte-rendu de la FAT, station fédérale de recherches en économie et technologie agricole.

Engrais simples		Energie primaire (MJ/kg)
N	Urée (46% N) (equiv. N)	63.7
	Ammonitrate 27% (equiv. N)	47.4
	Ammonitrate 33.5% (equiv. N)	47.4
	Solution azotée 30% (equiv. N)	54.8
P ₂ O ₅	Trisuperphosphate 45 (equiv. P ₂ O ₅)	17.1
	Scories Thomas (17% P ₂ O ₅) (equiv. P ₂ O ₅)	6.9
K ₂ O	Chlorure de potasse 60% (eq K ₂ O)	11.4
CaO	Chaux (eq. CaO)	2.4
SO ₃	Soufre (eq. SO ₃)	18
Engrais binaires N P		
N	22-22-0 (equiv. N)	54.5
P ₂ O ₅	22-22-0 (equiv. P ₂ O ₅)	11

Tableau 2 : Energie primaire totale de différents engrais – Issue du " référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole "

4.1.3 Bilan énergétique de la protection phytosanitaire

Les données retenues concernant les contenus énergétiques des matières actives ont été élaborées à partir des valeurs publiées par GREEN⁶ (1987) et pour certaines substances non disponibles dans les références de GREEN, il est tenu compte d'une règle d'extrapolation basée sur les travaux de GAILLARD (1997).

Le bilan énergétique des produits phytosanitaires tient compte de l'énergie dépensée pour la **fabrication** des matières actives, pour la **formulation**, mais aussi pour **l'emballage et le transport** des produits.

L'ensemble des données est produit pour une quantité de matière active, rattachée également à sa famille chimique d'appartenance.

L'utilisation de ces données implique donc de traduire les apports de produits phytosanitaires sur parcelles en équivalent de kg de matières actives rattachées à une famille chimique (à partir de l'index phytosanitaire de l'ACTA).

L'étude "Référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole", dans son annexe P1, fournit l'ensemble des valeurs retenues pour un centaine de molécules.

Voici ci-après quelques valeurs issues de cette table pour certaines molécules relativement "classiques".

⁶ GREEN, M B, 1987, Energy in pesticide manufacture, distribution and use, Helse, Energy in plant nutrition and pest control; Editions Elsevier

Matière active	Famille	Energie primaire (MJ/kg matière active)
Isoproturon	Dérivée de l'urée	280
Epoxiconazole	Triazole	204
Bromoxynil	Benzonitrile	295
Diflufénicanil	Anilide	295

Tableau 3 : Energie primaire totale de quelques matières actives phytosanitaires – Issu du " référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole"

4.1.4 Bilan énergétique des transports avec tracteur, de la mécanisation et des travaux cultureux

⇒ Transports en tracteur

Concernant les trajets effectués avec un tracteur, la consommation est calculée à partir de la consommation du tracteur (variable en fonction de sa puissance), sa vitesse et la distance parcourue

La consommation du tracteur est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Nbr chevaux} \times 0.24 \times 0.5 \text{ (consommation en demi charge)}$$

Cette consommation s'applique à des trajets de transport effectués par le tracteur (par exemple entre l'exploitation et la parcelle, ou bien entre la zone de stockage d'un effluent et la parcelle...). **Elle ne s'applique pas aux travaux cultureux sur parcelle.**

⇒ Machines agricoles et travaux cultureux

Concernant la mécanisation des travaux agricoles, le coût énergétique se décompose entre :

- les coûts liés aux machines (production des matériaux composant les machines, assemblage, entretien...), qui sont amortis sur la durée de vie de la machine;
- les coûts de fonctionnement, intégrant la consommation en carburant et en huile.

Pour le calcul des coûts énergétiques d'amortissement des matériels agricoles, les données sont issues du SESSI, et d'un mémoire de DEA (Lambert, 1996). Le contenu énergétique des constituant de la machine et le coût de l'assemblage et de la fabrication sont établis à partir d'une composition moyenne en matériaux constitutifs, tandis que l'énergie d'entretien et de réparation fait intervenir les coûts des réparations, la valeur à l'achat de la machine et la durée de vie de la machine (sources : ITCF et BCMA).

Le coût total d'investissement est calculé en amortissant la somme des trois composantes : contenu énergétique, coût d'entretien, de réparation, et d'assemblage sur la durée de vie de la machine.

L'étude "Référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole", dans son annexe M1, fournit les valeurs d'amortissement retenues pour une centaine de matériels. A titre d'exemple, le coût énergétique primaire d'amortissement d'un tracteur 2 roues motrices de 90 chevaux est de 16 MJ par heure d'utilisation. Pour un semoir 4 mètres, le coût est de 16 MJ par heure d'utilisation.

Pour les coûts de fonctionnement (travaux cultureux), les coûts énergétiques liés à la consommation de carburant sont calculés en utilisant la valeur du contenu énergétique du carburant et la consommation.

La consommation en carburant est très variable selon les travaux cultureux engagés. L'étude "Référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole", dans son annexe M2, fournit les valeurs de

coût énergétique lié aux consommations de carburant pour quelques matériels, mais aussi pour quelques travaux culturels spécifiques.

A titre d'exemple, le coût énergétique primaire du carburant pour un tracteur 2 roues motrices de 90 chevaux est de 431 MJ par heure d'utilisation (consommation de 10.8 litre / heure).

Le passage d'un semoir 4 mètres classique sur sol intermédiaire représente une consommation de 4 l / ha, tandis que le passage d'une charrue réversible 3 corps portée représente une consommation de 28 l / ha.

De même, le coût énergétique associé à la consommation d'huile est calculé en utilisant le contenu énergétique de l'huile et le volume consommé entre deux vidanges (volume du carter et volume du circuit hydraulique). Le temps entre deux vidanges étant estimé à 250 heures, le contenu énergétique primaire de l'huile étant également connu (51 MJ/kg), le coût énergétique primaire de l'huile par heure de fonctionnement du tracteur (en MJ / h) est égal à $= 0.21 \times V_{total}$, où V_{total} est le volume d'huile (carter + circuit hydraulique).

L'étude "Référentiel pour le calcul de bilans énergétiques de productions agricole", dans son annexe M3, fournit les valeurs de coût énergétique lié aux consommations d'huile pour quelques matériels. A titre d'exemple, le coût énergétique primaire de l'huile pour un tracteur 2 roues motrices de 90 chevaux est de 13 MJ par heure d'utilisation.

4.1.5 Choix méthodologiques pour la prise en compte de l'inter culture

L'inter culture correspond à la période entre la récolte de la culture à l'année n et le semis de la culture à l'année n+1. Le broyage et le ramassage des résidus sont affectés à la culture n.

Les coûts énergétiques des opérations au cours de l'inter culture peuvent être affectés soit à la culture précédente, soit à la culture suivante. Le référentiel propose une méthode d'imputation respectant les étapes suivante :

- liste des interventions réalisées pendant l'interculture et identification des objectifs poursuivis lors de ces informations
- calcul du coût énergétique global pour chaque intervention
- décider de la règle d'affectation aux cultures précédentes ou suivantes tenant compte des objectifs.

Un récapitulatif des règles d'allocations les plus courantes est proposé dans le Tableau 4:

Elaboration des bilans énergétiques des filières de
production de biocarburants
Synthèse des données disponibles

Interventions	Objectif	Règles d'allocation proposée
1 ^{er} déchaumage	Mélange des résidus, destruction adventices et repousses	Affectation à la culture précédente si il intervient moins d'un mois après la récolte de la culture précédente
Autres déchaumages	Mélange des résidus, destruction adventices et repousses	Affectation 100% à la culture suivante
Travail profond (labour)	Enfouissement des résidus, adventices, amélioration de la structure	Affectation 100% à la culture suivante
Reprise derrière travail profond	Préparation du lit de semence	Affectation 100% à la culture suivante
Semis et entretien de la culture intermédiaire	Lutte contre le risque de fuite de nitrates	Evaluation de la quantité d'azote susceptible de lessiver et affectation de chacun des postes de ce bilan aux cultures précédentes ou suivantes : - reliquat post récolte : culture précédente - minéralisation d'automne (culture suivante) - apports éventuels d'engrais organiques (culture suivante)
Apport d'engrais	Alimentation minérale	100% culture suivante si apport annuel Sinon, au prorata des cultures suivantes
Apports d'effluents	Alimentation minérale de ou des cultures suivantes, amélioration du statut organique du sol	Affectation selon le coefficient d'équivalence engrais
Amendements	Augmentation du pH, amélioration de la stabilité structurale	Affectation à part égale sur les cultures suivantes
Lutte chimique (adventices vivaces)	Destruction des adventices vivaces	Affectation à part égale sur les culture suivantes (100% dans le cas d'apport annuels)
Lutte chimique (adventices annuelles)	Destruction des adventices annuelles et repousses	Affectation à la culture précédente si l'intervention a lieu dans un délai de 1 mois après la récolte

Tableau 4 : Règles d'imputation les plus courantes pour la comptabilisation de la gestion de l'inter culture

4.1.6 Valeurs énergétiques pour certains produits et coproduits agricoles et choix d'allocation

Les parcelles agricoles peuvent produire, par campagne de production, plusieurs produits valorisés, par exemple des grains et de la paille pour une culture de blé. L'existence de plusieurs produits valorisés nécessite d'affecter les consommations et émissions de la parcelle agricole à ces différents produits.

Une première règle générale d'affectation peut être appliquée : lorsque les co-produits sont exportés hors de la parcelle, les coûts de leur gestion sont entièrement affectés à ces co-produits. Par exemple, pour la paille, les coûts énergétiques de la presse, du transport et du stockage sont affectés aux pailles. En revanche, si les co-produits sont enfouis, on affecte la totalité du coût énergétique de la culture au produit principal.

Dans le cas d'un bilan filière, la règle d'allocation retenue est une allocation massique aux différents co-produits exportés en tenant compte de la gestion des résidus.

Le Tableau 5 présente des valeurs indicatives pour les rapports massiques entre produits et co-produits de certaines cultures.

Espèce	Co-produit	% co-produit dans la MS totale	Source
Blé	Pailles	33%	ITCF
Betterave	Fanes	20 à 25%	ITB
Colza	Pailles	33%	CETIOM
Tournesol	Cannes	33%	CETIOM

Tableau 5 : Règle d'imputation : rapports massiques entre produits et co-produits

La prise en compte d'une imputation entre produits et co-produits agricoles varie selon le devenir des co-produits.

1^{er} cas : résidus enfouis

Dans le cas où les résidus sont enfouis, la règle d'imputation tient compte de la composition en N, P et K des co-produits (cf. Tableau 6). L'imputation tient compte du fait que l'enfouissement va éviter autant d'apports en engrais minéraux de synthèse. Aussi, la règle d'imputation se traduit par la soustraction du produit des contenus énergétiques des engrais de synthèse N, P₂O₅ ou K₂O avec le contenu en ces éléments des co-produits enfouis.

Produit	% MS	% N / t MS	% P ₂ O ₅ / t MS	% K ₂ O	% CaO	Sources
Pailles blé	88		1,8	12		Lajoux 1997
Pailles colza	66	1	1	5		CETIOM
Fanes betteraves	10	2,5	0,6	4,5	2,5	ITB, 1998
Cannes tournesol	66	0,2	0,2	6		ROLLIER 1975

Tableau 6 : composition des co-produits enfouis

Les contenus énergétiques primaires de référence pour la consommation évitée d'engrais de synthèse proposés sont les suivants :

Azote N = 47,4 MJ/kg, Phosphore P₂O₅ = 6,9 MJ/kg, Potassium K₂O = 1,4 MJ/kg et chaux CaO = 2,4 MJ/kg

2nd cas : co-produits exportés

Dans le cas des co-produits exportés, on effectue une allocation massique.

Par ailleurs, le Tableau 7 propose des valeurs de contenu énergétique (PCI) pour certains produits agricoles qui peuvent être intéressants dans le cadre de l'étude.

Produit	Energie brute (\cong PCS) kcal/kg PB	PCI Kcal/kg PB	PCI MJ/kg PB	PCI MJ/kg MS	Sources
Grains blé tendre (86% MS)	3790	3411	14,3	16,6	INRA, alimentation des animaux monogastriques
Racines de betterave sucrière (24% MS)	960	864	3,6	15,1	
Graines entière colza (86% MS)	6025	5423	22,7	25,2	
Graines de tournesol non décortiquées (90% MS)	6712	3690	15,4	17,2	
Pailles de céréales exportées			13,9	15,80	CCPCS 1991

Tableau 7 : valeur énergétique retenue pour les produits agricoles

4.2 Autres données disponibles

Les paragraphes suivants proposent des valeurs de référence qui sont en particulier reprises par Ecobilan dans différentes études.

La présentation de ces valeurs a pour objectif de disposer de référentiels supplémentaires, permettant d'une part de valider les ordres de grandeurs présentés dans les études, et d'autre part de déterminer la meilleure source de donnée que le comité de pilotage souhaite retenir dans le cadre de l'étude ADEME-DIREM.

4.2.1 Valeurs énergétique des principaux combustibles fossiles

Le tableau ci-dessous propose des valeurs de contenu énergétique de différentes ressources fossiles, correspondant d'une part à leur PCI, et d'autre part à la mobilisation d'énergie primaire totale que l'extraction de chacun de ces ressources représente.

	Contenu énergétique (PCI)	Energie primaire totale	Source
Charbon (MJ/kg)	28.3	32.1	ETHZ
Gaz Naturel (MJ/kg)	45.5	46.8	ETHZ
Pétrole (MJ/kg)	42.6	43.8	ETHZ
Electricité (en France) (MJ/kWh élec)	n.r.	11.0	Ecobilan sur la base de données EDF et ETHZ

Ces valeurs complètent les valeurs proposées dans le référentiel pris en compte dans "l'étude des référentiels pour les calculs de bilans énergétiques en production agricole" (voir paragraphe 4.1.1). A titre d'exemple, les valeurs prises en compte sur le charbon sont très voisines. En revanche, pour l'électricité, la valeur Ecobilan est significativement plus élevée.

4.2.2 Prise en compte des émissions de N₂O en agriculture

La prise en compte des émissions de N₂O en agriculture est particulièrement délicate en l'absence de mesures. Cependant, les apports d'azote sur parcelles agricoles, les mécanismes en jeu dans les cycles biologiques, et la participation importante du N₂O au calcul de l'indicateur de potentiel d'effet de serre nécessitent de s'accorder sur les valeurs de référence qui seront prises en compte dans l'étude quant aux émissions de N₂O sur parcelle agricole de chacune des filières de production des biocarburants.

La source de données utilisées au sein d'Ecobilan correspond à des valeurs publiées par l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), dans son manuel de référence⁷ qui a pour objectif d'aider les pays à quantifier leurs émissions liées à leurs productions et pratiques agricoles.⁸

Dans ce document, plusieurs sources d'émissions de N₂O sont distinguées, et pour chacune un mode de calcul des émissions est proposé. En particulier dans le cadre de l'étude ADEME DIREM, les sources d'émissions potentielles correspondent à l'application d'engrais minéraux de synthèse sur les parcelles.

⇒ Emissions de N₂O liées à l'application d'engrais minéraux

Les émissions de N₂O liées à l'épandage d'N minéral ou de fumure sont calculées à partir de la quantité d'azote appliquée sous forme d'engrais de synthèse ou de lisiers et fumiers.

Globalement, l'équation d'émission de N₂O retient un facteur d'émission d'azote sous forme N₂O de **0.0125**, à partir de la quantité d'azote appliquée sur la surface de culture. Mais ce facteur d'émissions est sujet à d'importantes variations en fonction des conditions du milieu (de 0.0025 à 0.0225).

Il peut être également intéressant de citer une autre source de données en matière d'émissions de N₂O liées à l'application d'engrais azoté. En effet, l'Argonne National Laboratory⁹ dans son modèle, cite la valeur moyenne qui a été retenue pour les émissions de N₂O sur les cultures de maïs : 1.22%. Il s'agit d'une valeur très voisine de celle retenue par l'IPCC.

4.2.3 Prise en compte des travaux sur les parcelles

Lors d'études ACV effectuées par Ecobilan dans le secteur agricole, la détermination des consommations de diesel à partir des itinéraires techniques était calculée en fonction du temps de passage des différents outils.

Les consommations sont ensuite calculées selon une formule de calculs validée par simulations de l'outil BASEMEQ développé par l'ITCF :

$$\text{Consommation de gasoil (l/ha)} = \text{Puissance absorbée (chv)} * \text{Temps passage (heures)} * 0.24$$

La puissance absorbée dépend de la puissance maximale de l'outil utilisé et du type de travail effectué. Aussi les coefficients de Pabsorbée/Pmax sont de :

- 0.7 pour les opérations de semis, cultivateurs;
- 0.75 pour le passage d'un rotavator;
- 0.85 pour les opérations de labour.

Notons que cette formule se rapproche de celle proposée dans "l'étude des référentiels pour les calculs de bilans énergétiques en production agricole", pour les transports en tracteurs, et non pas pour les travaux culturaux.

4.2.4 Valeurs énergétiques pour les engrais et produits phytosanitaires

Concernant les amendements minéraux, les sources de données utilisées chez Ecobilan retiennent les valeurs énergétiques suivante :

⁷ IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Reference Manual – Chapter 4 : Agriculture

⁸ 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.

⁹ voir présentation du modèle au paragraphe 10.2.1

	Energie primaire totale (MJ / kg)	Source
Ammonitrate (en kg N)	75.9	Fertilizer Handbook, Fertilizer Institute, Edition TDF, 1982 Et prise en compte de l'énergie des produits de synthèse
Potasse (en kg de K ₂ O)	4.4	Fertilizer Handbook, Fertilizer Institute, Edition TDF, 1982.
Superphosphate triple (en kg P ₂ O ₅)	43.9	Données industrielles, économiques, géographiques sur des produits chimiques (minéraux et organiques), métaux et matériaux, J.L. Vignes, G.André, F.Kapala, Union des Physiciens, Paris, 1994

Ces données sont significativement différentes de celles proposées dans "l'étude des référentiels pour les calculs de bilans énergétiques en production agricole". Ce sont vraisemblablement ces dernières valeurs qui seront prises en compte, du fait de leur âge plus récent.

Concernant la production des produits phytosanitaires, les données généralement reprises dans les ACV par Ecobilan sont issues d'une source bibliographique (1987), « Energy in World Agriculture – Energy in Plant Nutrition and Pest Control – Volume 2 », Editions Elsevier. Il s'agit de la même source utilisée dans "l'étude des référentiels pour les calculs de bilans énergétiques en production agricole".

4.2.5 Valeurs énergétiques de produits agricoles

Le suivi du contenu en énergie renouvelable des biocarburants nécessitera de s'intéresser aux contenus énergétiques des produits et coproduits de chacune des filières étudiées.

Il conviendra donc, au sein du comité de pilotage, de s'accorder sur le contenu énergétique de chacun de ces produits. Certaines de ces valeurs sont déjà présentées dans cette synthèse, dans l'analyse des études existantes, ainsi qu'au Tableau 5.

5 PRODUCTION D'ETHANOL ET D'ETBE A PARTIR DE BETTERAVES

5.1 Ecobilan de l'ETBE de betteraves – Comparaison avec le MTBE - 1996

5.1.1 Présentation synthétique de l'étude

L'étude a été effectuée en 1996 par Ecobilan, pour la Confédération Générale des Planteurs de Betteraves (CGB) et le Syndicat National des Producteurs d'Alcools Agricoles (SNPAA).

L'unité fonctionnelle retient une base de **comparaison énergétique** : "production d'une quantité de combustible ayant un pouvoir calorifique inférieur de 36.1 MJ".

Cette unité correspond à la combustion de 1 kg d'ETBE et 1.032 kg de MTBE.

L'étude produit également un bilan pour la mise à disposition de 1 kg d'éthanol issu de la transformation des betteraves.

Les produits étudiés comportent les spécifications techniques suivantes :

Elaboration des bilans énergétiques des filières de
production de biocarburants
Synthèse des données disponibles

	Ethanol	ETBE	MTBE
PCI (MJ/l)	21.28	26.9	26
PCI (MJ/kg)	26.8	36.1	35
Densité (kg/l)	0.79	0.75	0.75
Autre caractéristique	99.7% d'éthanol 3% d'eau	98.5% d'ETBE 1.5% d'éthanol	99.2% de MTBE 0.8% méthanol
Technique de production	Fermentation du sucre des betteraves et distillation	Procédé IFP : isobutène + éthanol -> ETBE L'isobutène est supposé produit par craquage catalytique de naphta.	Procédé IFP : isobutène + méthanol -> MTBE L'isobutène est supposé produit par craquage catalytique de naphta. Le méthanol est supposé produit à partir de gaz naturel.

Tableau 8 : Valeurs de référence utilisées dans l'Ecobilan de l'ETBE de betteraves

5.1.2 Description de la filière et des étapes prises en compte dans l'étude

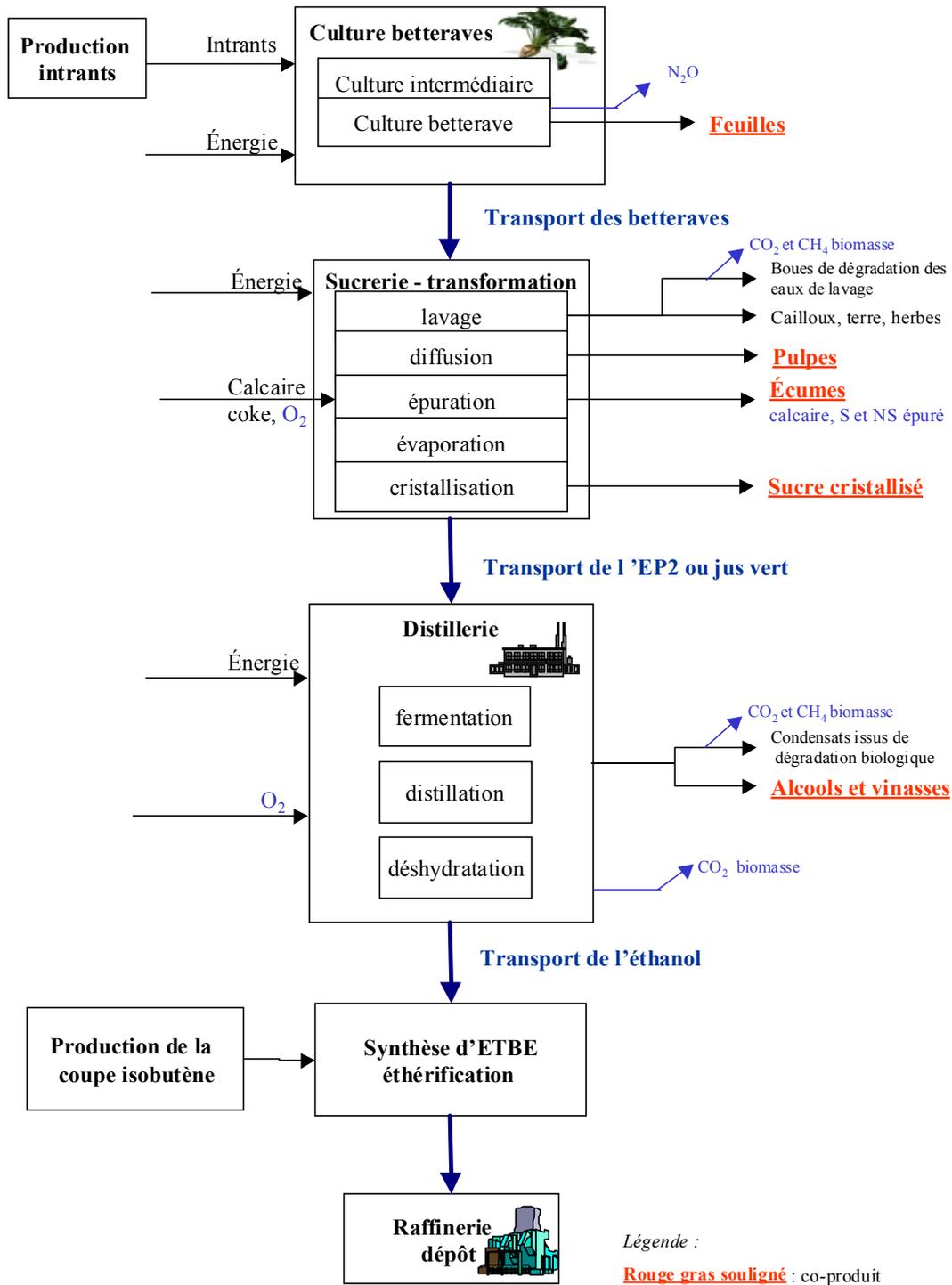


Figure 2 : Filière de production de l'éthanol de betterave et de l'ETBE

5.1.3 Sources des données

⇒ **Intrants agricoles :** les niveaux de fertilisation et d'application de produits phytosanitaires sont issus d'une étude de 1994 effectuée par la CGB.

- Semences : non prises en compte

- Engrais N : données sur la mobilisation d'énergie nécessaire à leur production à partir de plusieurs sources, mais principalement "Procédés de pétrochimie", Chauvel A., Lefebvre G, Castex L. Editions Technip, Paris 1985 et "Technical note on best available technologies not entailing excessive cost for ammonia production", Commission de la Communauté Européenne.
- Engrais P et K : données issues de "Energie und CO2 Bilanzierung nachwesender Rohstoffe", de Reinhardt Guido A, publié en 1993 par les éditions Vieweg, Wiesbaden.
- Phytosanitaires : les consommations d'énergie associées à la production des phytosanitaires ont été estimées à partir de données américaines "Energy in plant nutrition and pest control", Helsel Z.R., Stout B.A., Editions Elsevier, Amsterdam 1987.

⇒ **Itinéraires techniques et travaux culturaux** : transmises par l'Institut Technique de la Betterave (ITB).

L'itinéraire technique retenu tient compte¹⁰ des rotations de culture et de l'insertion d'une culture intermédiaire pour éviter le lessivage des nitrates : céréale n°1, moutarde (culture intermédiaire) + betterave, céréale n°2.

L'itinéraire technique intègre donc les étapes suivantes :

- Moutarde intermédiaire au moment du déchaumage après la récolte de la céréale n°1
- Destruction de la couverture végétale
- Préparation du sol
- Epandage engrais : K, P
- Labour
- Engrais N et B
- Préparation du sol
- Semis
- Application d'herbicides, de fongicides et d'insecticides
- Récolte – Résidus après récolte

Au cours de la culture des betteraves, il est tenu compte d'émissions de N₂O sur les parcelles issues de données d'experts. Les émissions de méthane, si elles apparaissent a priori faibles compte tenu du mode de culture (aérobie), ont cependant été reprises d'une étude "Ecobalance of ETBE", réalisée en 1992 par Concept SA.

⇒ **Rendement de culture** : issues d'une enquête menée par la CGB au cours des campagnes betteravières de 1991, 1992 et 1993.

⇒ **Transformation des betteraves en jus vert et EP2** : les données sont issues de la FCB et du site d'Arci-sur-Aube.

La moitié de l'éthanol est supposé produit à partir de jus vert pendant la campagne betteravière, et l'autre moitié à partir d'EP2 durant l'intercampagne.

¹⁰ Afin de déterminer les niveaux d'intrants et les caractéristiques des itinéraires techniques. Seules la culture de moutarde et celle de betterave sont incluses dans les frontières du système.

Pour les bilans matière, les données correspondent à des données représentatives au plan national des sucreries membres de la fédération et des sucreries de l'ensemble de la filière.

Pour les bilans énergétiques de la filière "jus vert" (étapes de lavage et de diffusion), les données sont issues du site d'Arcis sur Aube, durant la campagne betteravière de 1994.

Pour les bilans énergétiques de la filière "EP2", l'étude se base sur des données moyennes de différentes sucreries françaises en 1993.

⇒ **Fermentation et distillation d'éthanol :**

Pour les flux énergétiques, filière jus vert ou EP2, les données sont issues du site d'Arcis-sur-Aube au cours de la campagne et de l'intercampagne de 1994.

En revanche, les bilans matière et en particulier le rendement de la production moyenne d'éthanol à partir de sucre correspondent aux données moyennes constatées en distillerie par la FCB.

⇒ **Production d'une coupe isobutène :** les données ont été fournies par l'IFP. Elles correspondent à une production d'isobutène dans un four de craquage catalytique, en 1994.

⇒ **Synthèse d'ETBE :** les données de référence ont été transmises par l'IFP. Elles correspondent au procédé qui devait être mis en œuvre pour les sites de Dunkerque et Gonfreville en 1996.

⇒ **Les différents transports :** les modèles de transport utilisés correspondent aux modèles ACV issus de sources bibliographiques (Büwal). Concernant les distances de transport, les sources de données proviennent du Syndicat National de l'Industrie des Engrais (SNIE) pour l'approvisionnement en engrais, de la FCB pour le transport entre les parcelles et la sucrerie. La distillation est supposée être intégrée à la sucrerie. La distance entre la distillerie et la raffinerie a été supposée correspondre à la distance moyenne d'approvisionnement en alcool de l'unité d'éthérification d'ELF à Feyzin.

5.1.4 Choix méthodologiques

Dans l'étude, la modélisation du CO₂ au cours du cycle de vie tient compte du prélèvement dans l'atmosphère de CO₂ lors de la croissance de la betterave. En contrepartie, les émissions de CO₂ ou CH₄, qu'elles soient issues de combustibles fossiles ou bien de biomasse sont comptabilisées sans distinction.

L'étude suppose que la culture de betteraves se substitue à l'entretien d'une jachère longue. Cette jachère est prise en compte dans le système comparé à la filière ETBE : la filière MTBE.

Par ailleurs, différents co produits ont été identifiés pour cette filière. Le tableau ci-après récapitule les règles d'imputation qui ont été retenues pour chacun.

Etapes	Co-produits	Règles d'imputation choisie	Traduction des règles d'imputation
Culture de betteraves	Feuilles qui restent au champ dont le contenu en azote est réutilisé par les cultures suivantes	Soustraction de la quantité d'engrais minéral correspondant à la part d'azote qui sera récupérée par la culture suivante.	30 tonnes de feuilles par hectare à 10% de MS, et 3% d'N au sein de cette MS. 25%*90 kg par hectare.
Lavage des betteraves	Boues de lavage en parties valorisées comme engrais	Soustraction des quantités d'engrais minéral N, P et K correspondant à la part du contenu en ces éléments des boues qui sera réutilisée sur les cultures où elles sont épandues (26%).	Seules 50% des eaux sont épandues, aussi l'imputation concerne les quantités suivantes : 50%*26%*0.014 kg d'N par tonne de betterave traitée 50%*26%*0.019 kg de PO4 par tonne de betterave traitée 50%*26%*0.027 kg de K par tonne de betterave traitée
Diffusion des betteraves	Pulpes valorisées en général en alimentation animale	Imputation : clé de répartition massique entre le contenu en sucre du jus vert et la MS de la pulpe.	Jus vert : 77% Pulpe : 23%
Epuration du jus vert	Ecumes utilisées comme amendement organique	Soustraction des quantités d'engrais minéral N, P et K correspondant à la totalité du contenu des écumes en ces éléments.	0.315 kg d'N par tonne de betterave traitée 0.950 kg de PO4 par tonne de betterave traitée 0.031 kg de K par tonne de betterave traitée
Cristallisation du sirop	Sucre blanc cristallisé	Imputation par l'extension des frontières du système de la sucrerie	Différents sites de production de sucre, mélasse, jus vert et EP2 ont été modélisés, et ont permis par soustraction d'établir le bilan d'une production d'éthanol issue à 50% de jus vert, et à 50% d'EP2.
Distillation de l'EP2	Vinasses concentrées utilisées le plus souvent comme engrais	Soustraction des quantités d'engrais minéral N, P et K correspondant à la part du contenu en ces éléments des vinasses qui sera réutilisée sur les cultures où elles sont épandues.	55% ¹¹ des 0,5 kg d'N épandus par tonne de betterave traitée 40% des 1,5 kg de K épandu par tonne de betterave traitée
Production d'une coupe isobutène	- Production de plusieurs coupes lors du craquage catalytique - Production de vapeur	- Imputation massique des consommations d'énergie entre les différents produits pétroliers. - Prise en compte des impacts évités pour la production de vapeur.	

Tableau 9 : Règles d'imputation prises en compte dans l'Ecobilan de l'ETBE de betteraves

¹¹ Part valorisée par la culture où les vinasses sont épandues.

5.1.5 Valeurs énergétiques et gaz à effet de serre pour chacune des étapes

⇒ **Intrants agricoles :**

- **Engrais :**

Les valeurs suivantes tiennent compte de la présence de la culture intermédiaire (moutarde) qui diminue les besoins en azote, mais aussi du fait qu'une fraction des engrais phosphorés et potassiques enrichit le sol et est réutilisé dans les cultures succédant dans l'assolement. Les valeurs retenues dans l'étude correspondent donc aux seules quantités imputables à la culture betteravière précédée par la culture de moutarde (dernière ligne du tableau ci-dessous).

L'azote apporté l'est pour moitié sous forme d'ammonitrate (50% NO₃, 50% NH₄), et pour moitié sous forme de solution 39 (50% urée, 25% NO₃, 25% NH₄).

	N	P2O5	K2O
Apports sur betterave nue (kg /ha)	142.7	133.3	250
Consommations imputées à la culture de betterave (données COMIFER) (kg/ha)	142.5	70	175
Apports imputable à la betterave précédée d'une culture de moutarde (kg/ha)	112.5	70	175

Par ailleurs, les émissions de N₂O liées à la culture de betterave sont évaluées à 250 g N₂O par hectare. Celles de CH₄ à 2190 g /ha.

- **Produits phytosanitaires :**

La masse totale de matières actives consommées est de 4.37 kg/ha, dont 25% de soufre ou de composés assimilés à du soufre. Il s'agit d'une masse estimée à partir des quantités de produits commerciaux épanchés, et de la concentration en matière active de chacun des produits.

⇒ **Travaux culturaux :**

La consommation de gazole est estimée sur la base d'une consommation moyenne de 0.22 litres / ch / heure.

Consommations de gazole : **21 l / ha** pour la moutarde intermédiaire + **143 l / ha** pour la betterave

Les émissions atmosphériques liées à la combustion du gazole sont adaptées à partir d'essais réalisés en par l'IFP et publiés dans la revue de l'Institut Français du Pétrole en 1985. Les émissions de CO₂ prises en compte lors de cette combustion sont de 2643 g par litre de gazole.

⇒ **Rendement de culture : 67.3** tonne de betterave /ha, auxquelles on ajoute 16 tonnes de terre qui est transportée et lavée¹².

⇒ **Transformation des betteraves en jus vert et EP2**

Selon l'hypothèse prise dans l'étude d'une sucrerie produisant de l'éthanol à partir d jus vert et d'EP2 (à 50% chacun), la mobilisation moyenne d'énergie liée à cette transformation a pu être estimée.

¹² Une "tare-terre" de 24% a été retenue, c'est à dire le ratio de la masse de terre adhérent à la betterave et la masse de la betterave entière.

Ainsi, cette étape de transformation mobilise en moyenne 2.25 MJ/l ou encore 2.83 MJ/kg d'éthanol pur produit ultérieurement après distillation.

Cette énergie correspond à des consommations de fioul, de gaz, et de charbon, qui sont ensuite transformés en vapeur ou bien en électricité sur le site même de la sucrerie. L'électricité est donc auto produite.

En moyenne en 1993, les sucreries françaises utilisaient comme ressource énergétique le fioul (30.4%), le gaz (41.3%), le charbon (28.3%).

De plus, la sucrerie est source d'émissions de CO₂ et de méthane issus de la transformation de la biomasse. En particulier, ces émissions interviennent lors de la dégradation biologique aérobie et partiellement anaérobie des eaux de lavage. Les estimations d'émissions, basées sur les pertes en sucre dans ces eaux, sont de **4.95 kg de CO₂ biomasse** et de **0.125 kg de CH₄ biomasse** par tonne de betterave transformée.

⇒ Fermentation et distillation d'éthanol

a- A partir de jus vert, on obtient le bilan suivant :

1158 kg jus vert -> 108.2 l d'éthanol (85.94 kg) + 82.2 kg de CO₂ biomasse + 953.51 kg de vinasses.

Les vinasses produites sont recyclées en sucrerie et non pas valorisées en amendement organique, comme c'est le cas pour les vinasses concentrées issues de la fermentation et distillation à partir d'EP2.

La consommation d'énergie pour la fermentation et distillation de jus vert est de 807.8 MJ par hectolitre d'éthanol pur. Cette énergie correspond à des quantités de fioul, gaz et charbon, utilisées pour produire de l'électricité et de la vapeur nécessaires à ces procédés de transformation.

b- A partir d'EP2, on obtient le bilan suivant :

61.3 kg d'EP2 -> 21.5 l d'éthanol (17 kg) + 16.3 kg de CO₂ biomasse+ **21.08 kg de vinasses concentrées**.

Les vinasses concentrées sont valorisées en tant qu'amendement agricole.

Avec la filière EP2, les condensas résultants de la concentration des vinasses sont sources de rejets de CO₂ et de CH₄, du fait de leur dégradation partielle en conditions anaérobies. Ces émissions sont supposées être de 2 kg CO₂ biomasse par hectolitre d'éthanol et 0.05 kg de CH₄ biomasse par hectolitre d'éthanol

La consommation d'énergie pour la distillation et la concentration d'EP2 est de 34.1 kWh d'électricité et de 278.9 kWh de fioul, gaz et charbon par hectolitre d'éthanol pur.

c- Consommations énergétiques pour la déshydratation (par la technologie du tamis moléculaire):

Au delà des consommations énergétiques identifiées pour chacune des deux filières d'obtention d'éthanol (à partir de jus vert et d'EP2), l'étape de déshydratation est consommatrice d'énergie : 154.4 MJ de fuel, gaz et charbon utilisés pour la production d'électricité et de vapeur nécessaires au procédé de transformation.

⇒ Production d'une coupe isobutène

La production de la coupe isobutène nécessite une autoconsommation de 6% de la charge entrante. Elle s'effectue donc selon le bilan suivant :

1 kg naphta -> 0.94 kg d'isobutène + **0.33 kg de vapeur à 50 bars**

⇒ **Synthèse d'ETBE** : la réaction d'éthérification s'effectue selon le bilan suivant :

0.47 kg éthanol + 0.53 kg isobutène -> 1 kg ETBE

Cette synthèse mobilise **0.85 kg** de vapeur à 50 bars (issue des sous produits calorifiques de la raffinerie), et **0.014 kWh** d'électricité issue du réseau EDF.

Il n'y a pas d'émission atmosphérique outre celles liées à la production et combustion des ressources énergétiques nécessaires.

⇒ **Les différents transports :**

Les distances retenues dans l'étude sont les suivantes :

- engrais : 200 km par train + 100 km par route entre le site de production et l'exploitation agricole
- phytosanitaires : hypothèse de 300 km
- betteraves : 25 km par route entre les parcelles et les sucreries
- de la sucrerie à la distillerie : aucun transport pris en compte. La production s'effectue dans des unités intégrées de sucrerie-distillerie.
- de la distillerie à la raffinerie : 200 km par rail (distance moyenne d'approvisionnement de l'unité d'ELF à Feyzin).
- distribution de carburant : hypothèse de transport par route en moyenne sur 100 km.

Pour les transports routiers agricoles et de l'amont agricole, il est supposé que les camions effectuent des retours à vide (ce qui augmente leurs consommations).

5.1.6 Principales conclusions de l'étude

Du point de vue énergétique, la production d'un kg d'éthanol ou d'un kg d'EMHV se décompose comme suit :

	Ethanol	ETBE
Energie matière du produit (MJ)	26.8	36.1
Energie primaire consommée par les étapes de production (MJ)	22.75	38.9

Ainsi, le ratio entre l'énergie restituée par l'éthanol et l'énergie primaire mobilisée au cours du cycle de vie de ce produit jusqu'à la mise à disposition est de 1.2. Le même ratio pour l'ETBE est de 0.93.

La mobilisation d'énergie non renouvelable intervient principalement lors des étapes de production de la coupe isobutène (à 67% pour l'ETBE), mais aussi de production de l'éthanol dans la sucrerie-distillerie (à 25%).

Du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, pour la production d'éthanol, l'étude souligne que les émissions de CO₂ constituent la principale source de gaz à effet de serre. Les émissions de méthane et N₂O sont négligeables dans l'indicateur global de gaz à effet de serre¹³.

De plus, l'étude montre que les émissions de CO₂ lors de la production d'éthanol sont compensées par la capture de CO₂ lors de la croissance des betteraves¹⁴.

¹³ Cette conclusion doit être considérée avec prudence par rapport aux perspectives de l'étude lancée par l'ADEME et la DIREM : les coefficients de l'IPCC utilisés en 1996 sous estimaient légèrement la participation du méthane et du N₂O à l'effet de serre.

¹⁴ Le choix de modélisation a priori retenu dans l'étude ADEME-DIREM produira des résultats différents : l'étape de production d'éthanol en distillerie sera source de moins d'émissions de gaz à effet de serre, car une partie des émissions correspond à

Pour la production d'ETBE, le bilan des émissions de CO₂ est très voisin de celui de l'éthanol. En revanche, la production de la coupe isobutène et la synthèse de l'éther sont sources d'émissions de N₂O non négligeables à l'échelle de l'ensemble des émissions de ce composant sur le cycle de vie du produit.

5.2 Autres sources de données concernant la production d'éthanol

5.2.1 Argonne National Laboratory – Modèle de calcul du bilan énergétique et des émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie des carburants¹⁵

Le modèle propose de calculer les bilans pour la production d'éthanol à partir de maïs.

- **Choix méthodologiques**

L'étude « Transportation Fuel Model » menée par l'Argonne National Laboratory identifie différentes règles d'allocation possibles entre produits et co-produits de la filière de production d'éthanol.

- Allocation massique : d'après Wang, cette approche a peu de sens pour la plupart des co-produits, car un co-produit remplace rarement un autre produit sur une base massique.
- Allocation au contenu énergétique : d'après Wang, cette approche par contenu énergétique s'applique bien à l'éthanol, mais pas à ses co-produits. En effet, la valeur commerciale des co-produits est établie sur la base de leur valeur nutritionnelle, mais aussi d'autres caractéristiques. Le contenu énergétique n'intervient pas dans cette valeur commerciale.
- Extension des frontières du système : comme le souligne Wang, cette méthode d'approche correspond à la meilleure possible pour la prise en compte des co-produits. Cependant, Wang souligne qu'il est difficile d'identifier les produits réellement substitués et le ratio de remplacement entre les co-produits de l'éthanol et produits substitués. De plus, les produits d'alimentation animale produits aux Etats Unis sont en majorité exportés. Aussi, l'évaluation de l'influence de ces produits dans les pays d'importation sont difficiles à estimer. L'utilisation de cette méthode est d'autant plus difficile.
- Allocation économique : cette méthode consiste à considérer la valeur économique de chaque produit. Wang souligne cependant que cette approche est limitée du fait de la fluctuation des prix sur le marché de l'éthanol et de ses co-produits.
- Allocation selon les étapes du processus : cette méthode consiste à distinguer les consommations d'énergie propres aux étapes de production d'éthanol et celles propres à la production des co-produits. Cependant, cette méthode ne peut pas s'appliquer à tous les cas. Par exemple, les étapes de cultures du maïs et les étapes communes de production de l'éthanol et de ses sous-produits, nécessitent d'appliquer une autre méthode.

Pour la filière éthanol et ses co-produits, parmi toutes ces méthodes, l'outil GREET offre la possibilité de choisir entre une allocation économique et la méthode d'allocation par extension des frontières du système.

des émissions de Carbone biomasse ne contribuant pas à l'indicateur. En revanche, le bénéfice de la capture de CO₂ lors de la croissance des plantes ne sera pas pris en compte.

¹⁵ Le modèle est présenté au paragraphe 10.2.1.

- **Données issues du modèle**

Ethanol (de maïs)	
Densité	2996 g/gal ¹⁶ : 0,79 kg/l
PCI	76 000 Btu/gal ¹⁷ : 26,76 MJ/kg

5.2.2 U.S. Department of Agriculture : estimation du bilan énergétique de la filière éthanol (1995)

Cette étude vise d'une part à faire une synthèse de l'ensemble des études traitant du sujet aux Etats Unis et d'autre part de proposer un bilan énergétique de l'éthanol de maïs.

Selon les auteurs, la règle d'imputation des co-produits varie selon les études.

Voici l'analyse qui a été effectuée dans l'étude sur les différentes règles d'imputation :

- Imputation au contenu énergétique : cette approche par contenu énergétique conduirait à imputer 40% des consommations aux co-produits de la filière éthanol de maïs. La difficulté de cette référence énergétique est que dans un contexte où les produits sont utilisés en alimentation animale, la valeur énergétique correspondra à la valeur nutritionnelle des produits, ce qui est cohérent. En revanche, dans un contexte de production de carburants, cette référence n'est pas adaptée.
- Allocation économique : cette approche conduirait à imputer 30% des consommations aux co-produits de la filière éthanol de maïs. L'étude souligne cependant que cette approche est limitée du fait de la fluctuation des prix sur le marché de l'éthanol et de ses co-produits, et que cette fluctuation est indépendante du contenu énergétique des produits.
- Allocation massique : cette approche conduirait à imputer 52% des consommations aux co-produits de la filière éthanol de maïs. L'étude n'évalue pas favorablement cette méthode, car elle ne correspond pas à une bonne estimation de la valeur énergétique des produits.
- Extension des frontières du système : cette méthode conduirait à imputer 20% des consommations aux co-produits de la filière éthanol de maïs.

Dans le cadre de cette étude précise, **la règle retenue est celle de l'extension des frontières du système** (substitution). En effet, il s'agit d'une approche prudente, car cette méthode propose le crédit minimum aux co-produits de la filière éthanol de maïs.

5.3 Bilan des données disponibles et des actualisations à envisager sur la filière éthanol et ETBE de betterave

L'étude CGB SNPAA constitue une référence solide pouvant être valorisée dans le cadre de l'étude ADEME-DIREM. En effet, elle porte sur la filière éthanol de betterave, et a pour cadre de référence le contexte français.

Certaines actualisations doivent cependant être envisagées.

- **Concernant l'amont agricole**, il est important de valider que l'itinéraire technique retenu est toujours cohérent avec les pratiques actuelles. Les données de l'étude sur les "références pour le calcul des bilans énergétiques de productions agricoles" méritent vraisemblablement d'être utilisées dans le cadre de l'étude ADEME-DIREM.

¹⁶ Gallon : 1 gal US = 3,785 litre

¹⁷ Btu : British Thermal Unit : 1 Btu = 1 054,8 Joule ; mmBtu = 10⁶ Btu

- Concernant la **transformation** des betteraves en éthanol, compte tenu des évolutions intervenues depuis 1996 sur les sites de production, il importe d'identifier un site représentatif de la situation actuelle ou en cours de développement à court terme, en particulier vis-à-vis de la distillation de l'éthanol. Cette étape est effectivement contributrice à l'échelle du bilan global de la filière. Elle mérite donc d'être actualisée.
- Concernant la **production de la coupe isobutène**, le procédé et les valeurs retenues dans l'étude, compte tenu de l'importance de leur participation au bilan global en terme d'énergie mériteraient d'être validées.
- Concernant les **transports**, la définition d'un scénario moyen représentatif de la filière éthanol de betteraves en France. L'ensemble des distances et des modes de transports décrits devra être validé par le comité de pilotage.
- Concernant les **choix d'imputation** des sous-produits agricoles épandus et valorisés en tant qu'engrais N, P, K, il conviendra pour chacun de ces produits de valider avec les acteurs de la filière la part de valorisation effective de ces produits ainsi que leur contenu en N, P, K. Sur cette base, la règle d'imputation de 100% des impacts évités de production d'engrais de synthèse, conformément aux préconisations de l'étude sur les "références pour le calcul des bilans énergétiques de productions agricoles" pourra être appliquée à la filière éthanol et ETBE de betteraves.

Enfin, l'étude a exclu des frontières du système les réactifs utilisés en phase de diffusion et de fermentation. Il pourrait être opportun de justifier cette exclusion en quantifiant la part de ces réactifs dans la masse totale des produits entrant dans la production (application d'une règle de coupure).

De plus, il est important de souligner que l'étude n'inclut pas les impacts de la production des bases pétrolières (additifs) avec lesquelles l'ETBE est mélangé pour la formulation d'essences. C'est une limitation qui se retrouvera dans l'étude ADEME-DIREM, qui a contribué notamment à la décision du comité de pilotage¹⁸ de retenir une unité de référence d'étude qui corresponde à des produits non mélangés.

6 PRODUCTION D'ETHANOL ET D'ETBE A PARTIR DE BLE

Aucune source bibliographique n'a pu être identifiée concernant cette filière de production d'éthanol.

Sans pouvoir l'établir aussi précisément que pour les autres filières, il est cependant possible de proposer certains éléments dont nous disposons, et d'identifier les besoins de collecte de données sur cette filière.

6.1 Description de la filière et des coproduits

Le schéma suivant propose un descriptif a priori de la filière et de ses coproduits.

¹⁸ Lors de la réunion de lancement

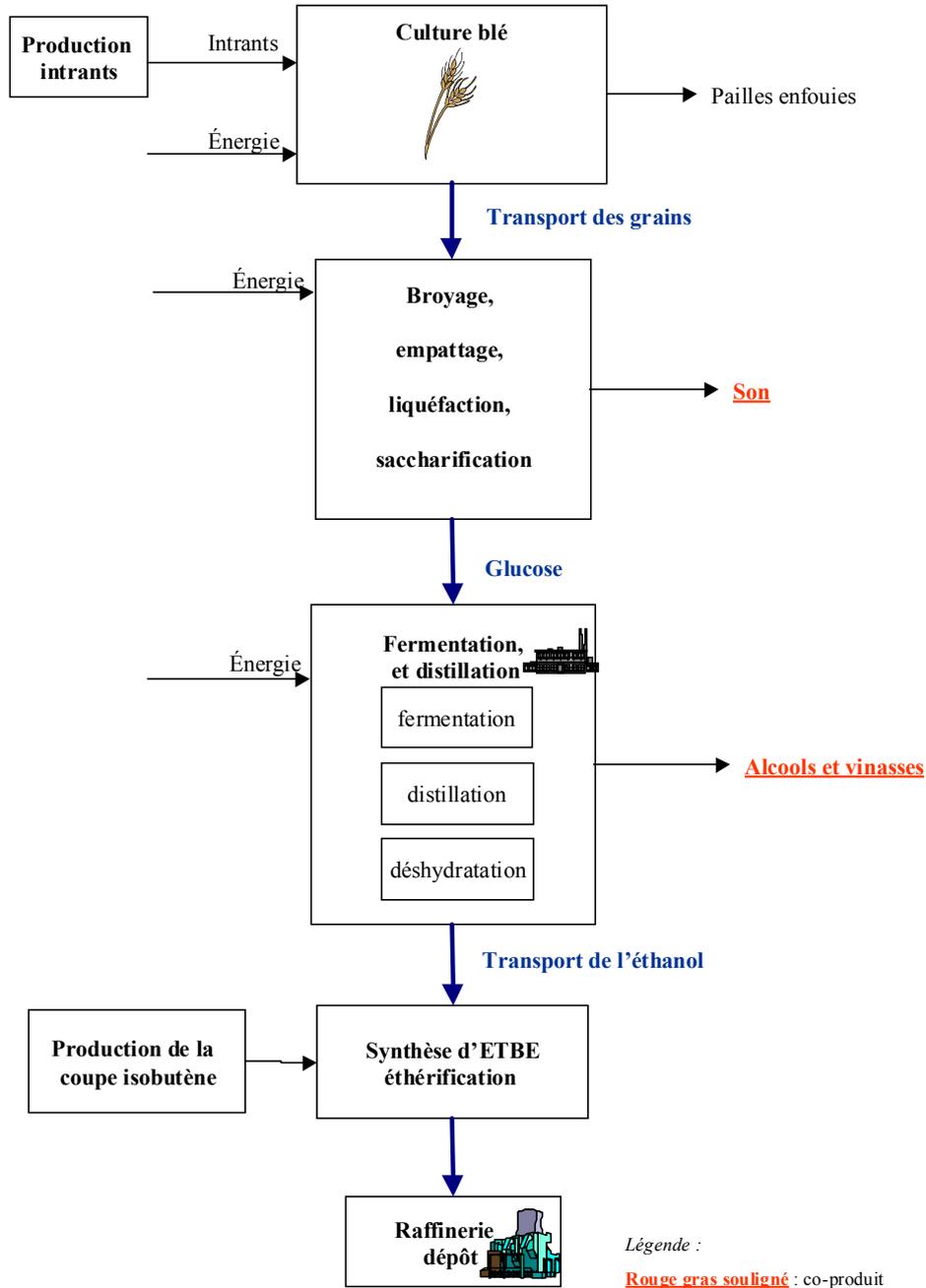


Figure 3 : *A priori*, filière de production de l'éthanol et de l'ETBE de blé

Ce schéma mérite d'être validé par les représentants de la filière. En effet, la définition exacte des co-produits et des consommations de produits nécessaires au fonctionnement du procédé industriel mérite d'être affinée.

6.2 Bilan des données disponibles et des besoins de collecte

6.2.1 Production agricole du blé

Ecobilan dispose de sources de données qui avaient été transmises par l'ITCF en 2000, lors d'une ACV de produits issus de l'agriculture. Ces itinéraires techniques correspondent à ce qu'on peut rencontrer dans des exploitations bretonnes, productrices de lait.

Les apports en fertilisation azotée sont supposés compenser les besoins du blé, et tiennent compte des arrières-effets des apports organiques antérieurs.

- **Semences** : Variété Altria, **1.4 q/ha**. Ces semences sont traitées par de l' AUSTRAL plus à 0.5 l/q.

- **Engrais minéraux** :

N = 110 kg/ha (1 engrais NPK et 1 passage ammonitrates)

P2O5 = 20 kg /ha (°)

K2O = 60 kg/ha (°)

Pas d'apport d'engrais organiques ou de compost.

- **Phytoprotecteurs** :

Dés herbants : QUARTZ 2 l/ha

Régulateurs : CYCOCEL CL 2.2 l/ha

Insecticides : KARATE K 1 l/ha (*mélangé à Ogam*)

Fongicides : UNIX 0.6 l/ha + OPUS 0.7 l/ha; et OGAM 1 l/ha

- **Travaux culturaux** :

Travaux du sol : Charrue, Herse rotative couplée au semoir, 3m classique, 1 ha/heure

Epannage engrais : 2 passages

Pulvérisation : 4 passages

Récolte : Moissonneuse batteuse 4 m 1 ha/heure

- **Rendements** : **70 q/ha grains** à 14% humidité soit env. 600 kg MS grains/ha + 5000 kg de MS / ha de paille

Aucune interculture n'est prise en compte sur l'itinéraire du blé.

De plus, ces données ne tiennent pas compte des consommations énergétiques de séchage et de stockage des grains.

6.2.2 Production de glucose à partir de blé

Aucune donnée n'est disponible actuellement. Les données devront être collectées auprès de BENP ou d'un interlocuteur de la filière.

6.2.3 Production d'éthanol à partir de glucose

Aucune donnée n'est disponible actuellement. Les données devront être collectées auprès de BENP ou d'un interlocuteur de la filière.

6.2.4 Production d'ETBE à partir d'éthanol de blé

Sous réserve de validation par le comité de pilotage, les données pourront être reprises à l'identique de ce qui est effectué sur la filière ETBE à partir d'éthanol de betterave (synthèse de la coupe isobutène et réaction d'éthérisation).

6.2.5 Les transports

L'ensemble des transports et leur modalité nécessitera d'être défini par les intervenants de la filière éthanol de blé.

7 PRODUCTION D'HUILE ET D'EMHV A PARTIR DE COLZA

7.1 Analyse du cycle de vie du diester, évaluation comparée des filières gazole et diester - 1993 à 1999

7.1.1 Présentation synthétique de l'étude

L'étude a été réalisée initialement en 1993 pour le compte de l'Organisation Nationale Interprofessionnelle des Oléagineux (ONIDOL). Elle a fait l'objet d'une double actualisation en 1996 puis en 1999 par l'ONIDOL, en collaboration avec Ecobilan.

L'unité fonctionnelle retient une base de **comparaison énergétique** intégrant les performances du moteur : "le parcours d'un cycle normalisé par un véhicule donné". Cette unité se traduit par la définition d'un km moyen pour un couple gazole/véhicule léger, et d'un kWh moyen pour un couple gazole/tracteur.

L'étude compare les performances du diester (EMHV dont la marque a été déposée par Sofiproteol), pur ou bien en mélange à 30% dans du diesel, avec du carburant diesel "classique".

L'étude présente également des résultats pour la mise à disposition de 1 kg d'ester méthylique de colza.

Les produits étudiés comportent les spécifications techniques suivantes :

	Huile de colza	EMHV
PCI (MJ/l)	34.3 (source biblio)	32.8
PCI (MJ/kg)	37.3 ¹⁹	37.5
Masse volumique à 25°C (kg/dm ³)	0.92 (source biblio)	0.87
Technique de production	Trituration des graines de colza	Estérification de l'huile de colza méthanol + huile -> EMHV

¹⁹ Les valeurs de contenu énergétique de l'huile de colza et de densité sont issues de sources bibliographiques, ces données n'étant pas directement utilisées dans l'étude, celle-ci effectuant le bilan de l'EMHV, basé sur des quantités de graines de colza exprimées en masse.

7.1.2 Description de la filière et des étapes prises en compte dans l'étude

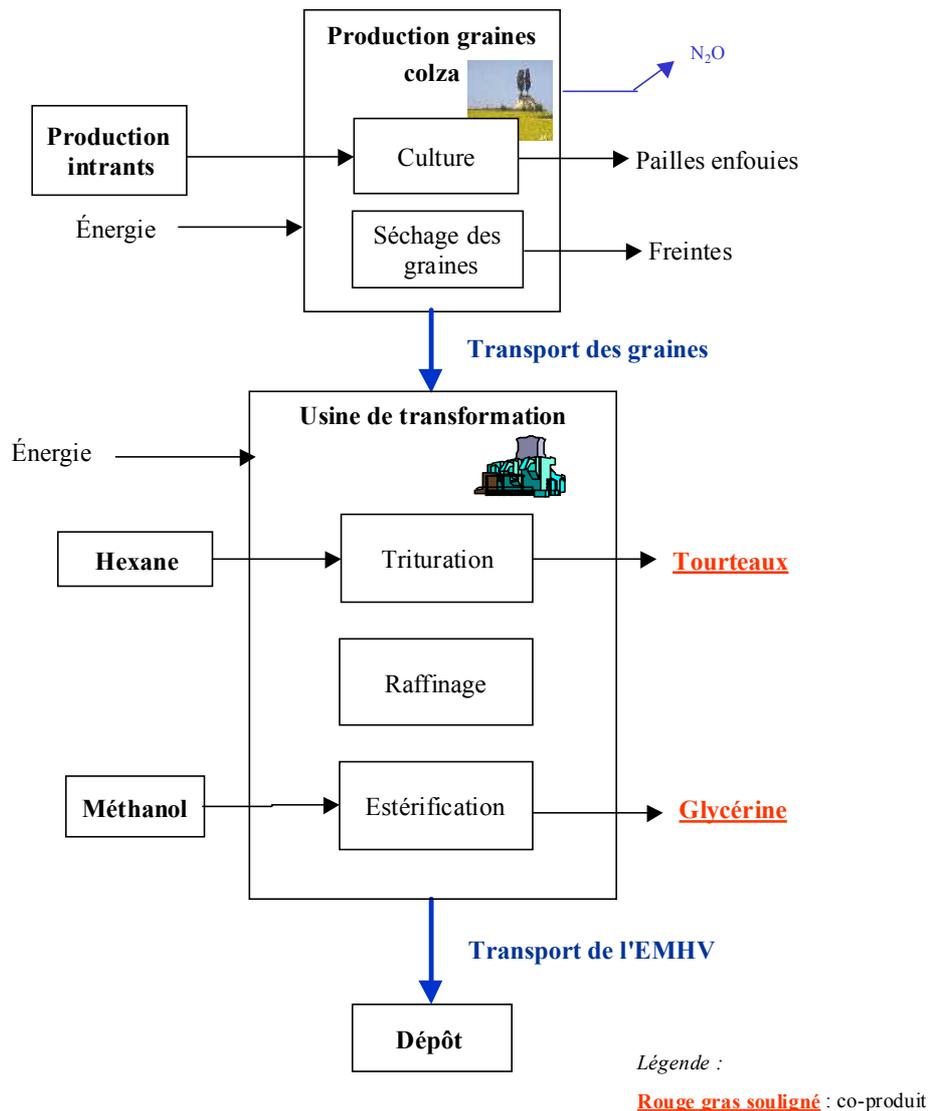


Figure 4 : Filière de production de l'huile de colza et de l'EMHV

7.1.3 Sources des données

⇒ **Intrants agricoles :**

- Semences : non prises en compte
- Engrais : les données sont issues du bilan énergétique de la fabrication des engrais, réalisé en 1991 par le Syndicat National de l'Industrie des Engrais (SNIE), l'Association des Producteurs de Blé (AGPB)
- Phytosanitaires : les consommations d'énergie associées à la production des phytosanitaires ont été estimées à partir de "Energy in World Agriculture", Helsel, Editions Elsevier 1987.

⇒ **Itinéraires techniques et travaux culturaux :**

Le Centre Technique des Oléagineux Métropolitains (CETIOM) a fourni les données relatives aux apports d'azote sur les exploitations. Ces données ont été actualisées en 1996.

Le Centre régional de machinisme agricole du Poitou-Charentes et l'Union des Coopératives de Bourges ont fourni les données relatives aux consommations d'énergie pour les travaux culturaux et pour le séchage et le stockage des graines.

⇒ **Rendement de culture** : les données correspondent à une actualisation par l'ONIDOL en 1999.

⇒ **Trituration des graines, Raffinage, Estérification** : les données sont issues de l'unité expérimentale de transestérification de Compiègne (ROBBE SA).

Pour l'ensemble de ces étapes, les données ont été actualisées en 1996.

Pour l'estérification, les données correspondent au procédé ESTERFIP développé par l'IFP.

⇒ **Les différents transports** : les distances retenues ont été validées par l'ONIDOL.

A titre d'information, la filière gazole à laquelle la filière diester est comparée est modélisée à partir de sources de données bibliographiques (Büwal), complétées par des données IFP pour les émissions lors de la combustion des carburants dans les moteurs.

7.1.4 Choix méthodologiques

Dans l'étude, la modélisation du CO₂ tient compte du prélèvement dans l'atmosphère de CO₂ lors de la croissance du colza. L'étude modélise ce prélèvement en tant que CO₂ biomasse. En contrepartie, les émissions de CO₂, lors de la combustion de l'EMHV sont divisées entre une part d'émission fossile, et une part biomasse ne contribuant pas à l'effet de serre.

Dans le scénario de référence de l'étude, il est supposé que la culture du colza se substitue à une jachère nue. L'une des simulations de l'étude porte sur l'hypothèse de substitution de la culture de colza à vocation industrielle à une culture à vocation alimentaire.

Enfin, le tableau ci-après récapitule les règles d'imputation qui ont été retenues pour chacun des co produits identifiés sur la filière huile et EMHV de colza.

Étapes	Co-produits	Règles d'imputation choisie	Traduction des règles d'imputation
Trituration des graines de colza	Tourteaux de colza valorisés en alimentation animale.	Imputation massique	45.6% à la production d'huile 54.4% à la production de tourteaux
Estérification	Glycérine valorisée en parfumerie, cosmétologie.	Imputation massique	90.7% à la production de l'EMHV 9.3% à la production de la glycérine

Tableau 10 : Règles d'imputation pour les co-produits de la filière colza

En 1993, l'une des simulations de l'étude consistait à évaluer l'influence du changement de la règle d'imputation : passage à une imputation économique. Dans ce cas, la règle d'imputation est de 66% pour l'huile et 44% pour les tourteaux pour l'étape de trituration, et de 100% à l'EMHV pour l'étape d'estérification.

7.1.5 Valeurs énergétiques et gaz à effet de serre pour chacune des étapes

⇒ **Intrants agricoles :**

- **Engrais :**

Les apports d'engrais retenus dans l'étude sont par hectare de colza : 50 kg de K₂O, 180 kg d'azote (sous forme d'ammonitrate), et 80 kg de P₂O₅.

De plus, les émissions de N₂O liées à la culture de colza ont été actualisées en 1999, et sont évaluées à 1886 g de N₂O par hectare cultivé. Aucune émission de méthane n'est prise en compte.

- **Produits phytosanitaires :**

La masse totale de matières actives consommées est de 2.3 kg par hectare.

La production de ces produits n'intègre que des données sur la mobilisation énergétique nécessaire à la synthèse.

⇒ **Travaux culturaux :**

La consommation de gazole, pour les différents travaux effectués avec un tracteur, a été estimée à **76 litres** par hectare.

Les émissions atmosphériques liées à la combustion du gazole sont adaptées à partir d'essais réalisés en par l'IFP et publiés dans la revue de l'Institut Français du Pétrole en 1985. Les émissions de CO₂ prises en compte lors de cette combustion sont de 2643 g par litre de gazole.

L'étude tient compte également de consommations électriques de 46 kWh par hectare cultivé, correspondant à la réception, au nettoyage et au séchage des graines.

Cette opération produit des freintes (déchets des graines) valorisées en alimentation animale. Cette valorisation n'a pas fait l'objet d'une imputation dans l'étude.

⇒ **Rendement de culture : 3.312 tonnes de graines de colza /ha**

La récolte des graines de colza s'accompagne de l'enfouissement de la paille. L'économie de fertilisation ainsi induite pour la culture suivante n'a pas été prise en compte dans l'étude.

⇒ **Trituration des graines :** Le bilan s'établit comme suit :

2.56 tonnes de graines de colza + 3.84 kg d'hexane -> 1 tonne d'huile brute + **1.56 tonne de tourteaux**

Par tonne de graine entrant en trituration, les consommations énergétiques sont de 45 kWh d'électricité et 250 kWh de gaz naturel.

Le procédé de trituration produit des boues d'épuration des eaux qui semblent valorisées. Il n'a été tenu compte d'aucune imputation dans l'étude pour cette valorisation.

⇒ **Raffinage :** le raffinage est supposé produire 1 kg d'huile raffinée à partir d'1 kg d'huile brute.

Par tonne d'huile brute traitée, les consommations énergétiques de cette étape sont de 8 kWh d'électricité, et 83 kWh de gaz naturel.

Le raffinage utilise de l'acide phosphorique (0.75 kg par tonne d'huile), ainsi que de la soude (0.67 kg par tonne d'huile).

Le raffinage contribue également à la production de boues d'épuration des eaux qui semblent valorisées. Il n'a été tenu compte d'aucune imputation dans l'étude pour cette valorisation.

⇒ **Estérification** : Le bilan s'établit comme suit :

1.022 tonne d'huile raffinée + 110 kg de méthanol -> 1 tonne d'EMHV + **113.5 kg de glycérine**

Par tonne d'ester produit, les consommations d'énergie sont de 70 kWh d'électricité et 400 kWh de gaz naturel.

Le procédé consomme d'autres produits en faible quantité comme la soude ou l'acide sulfurique.

⇒ **Les différents transports** :

Les distances retenues dans l'étude sont les suivantes :

- engrais : leur transport pour approvisionner l'exploitation n'est pas pris en compte.
- phytosanitaires : leur transport pour approvisionner l'exploitation n'est pas pris en compte.
- colza : 200 km par la route entre les parcelles et les usines de trituration des graines. Le transport est supposé s'effectuer avec un retour à vide.
- de la trituration à l'estérification : aucun transport n'est pris en compte, l'ensemble des procédés de transformation étant intégré sur le même site.
- distribution du carburant : la distribution de l'EMHV est supposée s'effectuer par train, sur 100 km.

7.1.6 Principales conclusions de l'étude

Du point de vue énergétique, la production de 1 kg d'huile de colza ou d'EMHV se décompose comme suit :

	Huile de colza	EMHV
Energie matière du produit (MJ)	37.3 <small>(source biblio)</small>	37.5
Energie primaire consommée par les étapes de production (MJ)	8	13.4

Ainsi, le ratio entre l'énergie restituée par le carburant et l'énergie primaire mobilisée au cours du cycle de vie du produit est de 2.8 pour l'EMHV étudié, et de 4.6 pour l'huile de colza²⁰.

Au sein de la filière de production du diester, la consommation d'énergie fossile est liée principalement (à 60%) à la phase de transformation industrielle des graines (à 16% pour l'étape de trituration/raffinage, et à 44% pour la phase d'estérification). L'utilisation de méthanol représente la principale consommation d'énergie de l'étape industrielle.

La phase de production agricole représente 38% de la mobilisation d'énergie fossile, avec une participation importante des engrais azotés dans ce pourcentage.

Du point de vue des émissions de gaz à effet de serre, les émissions de CO₂ constituent la principale source de contribution à l'indicateur.

Le bilan (par kg) de chacun des deux produits du point de vue des émissions de gaz à effet de serre s'établit comme suit²¹ :

²⁰ Sur la base de valeurs bibliographiques de PCI de l'huile de colza.

²¹ L'indicateur effet de serre à échéance 20 ans a été calculé avec les coefficients actuels fournis par l'IPCC.

	Huile de colza	EMHV
CO ₂ (g)	399	505
CH ₄ (g)	1.3	2.3
N ₂ O (g)	0.7	0.66
Indicateur effet de serre (g eq. CO ₂)	672	829

7.2 Autres sources de données

7.2.1 Argonne National Laboratory – Transportation Fuel Model (Greet Model)

L'étude américaine menée par Michael Wang, Argonne National Laboratory²², traite également des bilans énergétiques des filières de production d'ester méthylique d'huile végétale. Aux Etats Unis, l'essentiel des huiles végétales provient de la culture de soja.

- **Choix méthodologique**

Dans son étude, pour cette filière EMHV de soja, Wang compare différentes règles d'allocation entre produits et co-produits de l'étape d'extraction de l'huile. Le Tableau 11 présente à titre indicatif les pourcentages d'allocation retenus par le modèle selon la règle d'allocation choisie :

Méthode d'allocation	Etape d'extraction		Etape de transestérification	
	Huile de soja	Tourteaux	Biodiesel	Glycérine
<i>Massique</i>	18,2%	81,8%	82,4%	17,6%
<i>Economique</i>	33,6%	66,4%	70,1%	29,9%
<i>Extension des frontières du système</i>	62,1%	37,9%	79,6%	20,4% ²³

Tableau 11 : Allocation des consommations d'énergie et des émissions entre produits et co-produits

Cependant, dans l'outil de modélisation GREET, pour la filière soja, la règle retenue correspond à une **allocation économique**.

- **Données issues du modèle**

	Methyl Ester (biodiesel)	
Densité	3346 g/gal ²⁴	: 0,88 kg/l
PCI	117 090 Btu/gal ²⁵	: 36,92 MJ/kg

²² Voir la présentation du modèle au paragraphe 10.2.1.

²³ Dans le cas de l'absence de production de glycérine à partir de soja, il a été considéré dans le modèle américain que celle-ci était produite à partir de pétrole brut.

²⁴ Gallon : 1 gal US = 3,785 litre

²⁵ Btu : British Thermal Unit : 1 Btu = 1 054,8 Joule ; mmBtu = 10⁶ Btu

7.3 Bilan des données disponibles et actualisations à envisager sur la filière huile et EMHV de colza

L'étude ONIDOL constitue une référence solide et en grande partie actualisée pouvant être valorisée dans le cadre de l'étude ADEME-DIREM. Cette étude s'avère particulièrement adaptée à la description du contexte français de production d'huile et d'EMHV de colza.

Certaines validations doivent cependant être envisagées.

- **Concernant l'amont agricole**, il est important de valider que l'itinéraire technique retenu est toujours cohérent avec les pratiques actuelles. Les données de l'étude sur les "références pour le calcul des bilans énergétiques de productions agricoles" méritent vraisemblablement d'être utilisées dans le cadre de l'étude ADEME-DIREM. En particulier, si les pailles sont enfouies, l'apport évité d'engrais de synthèse doit être pris en compte.

Il importe également de valider qu'aucune irrigation n'intervient sur les cultures de colza en France. Le contraire nécessiterait de prendre en compte cette irrigation dans le bilan de la filière.

- Concernant la **transformation** des graines en huile, l'étude n'impute aucun crédit à la valorisation des boues d'épuration issues du procédé de trituration. Il convient donc de valider la valorisation de ces boues dans le contexte actuel français, et le cas échéant, d'appliquer la règle d'imputation proposée dans l'étude sur les "références pour le calcul des bilans énergétiques de productions agricoles".

Il est également important de valider le modèle de production de méthanol, en le confrontant si possible à d'autres sources de données, car il constitue un contributeur majeur du bilan du produit du point de vue énergétique.

- Concernant les **transports**, la définition d'un scénario moyen représentatif de la filière huile et EMHV de colza en France. L'ensemble des distances et des modes de transports décrits devra être validé par le comité de pilotage.

Enfin, il pourrait être opportun de justifier l'exclusion de certains consommables (produits acido-basiques consommés lors du raffinage) de l'analyse de la filière, en quantifiant la part de ces réactifs dans la masse totale des produits entrant dans la production.

8 PRODUCTION D'HUILE ET D'EMHV A PARTIR DE TOURNESOL

8.1 Aspects énergétiques de l'ester de méthyle de tournesol - 1995

8.1.1 Présentation synthétique de l'étude

L'étude a été menée en 1995 par Mme RIOU et M. Reau du CETIOM.

L'objectif de l'étude était de dresser des bilan énergétique de la production d'ester de méthyl de tournesol. En effet, si la priorité pour la production de biocarburant a été donnée au départ à la culture de colza, les agriculteurs du sud-ouest de la France ont souhaité produire du tournesol sur jachère plutôt que du colza.

De ce fait, il est apparu nécessaire de réaliser une étude du bilan énergétique de la filière.

Les produits et co-produits étudiés comportent les caractéristiques suivantes :

	EMHV tournesol (supposé équivalent à celui de colza)	Tourteaux de tournesol	Glycérine
PCI (MJ/kg)	37.7 ²⁶	17.276	16.27

8.1.2 Description de la filière et des étapes prises en compte dans l'étude

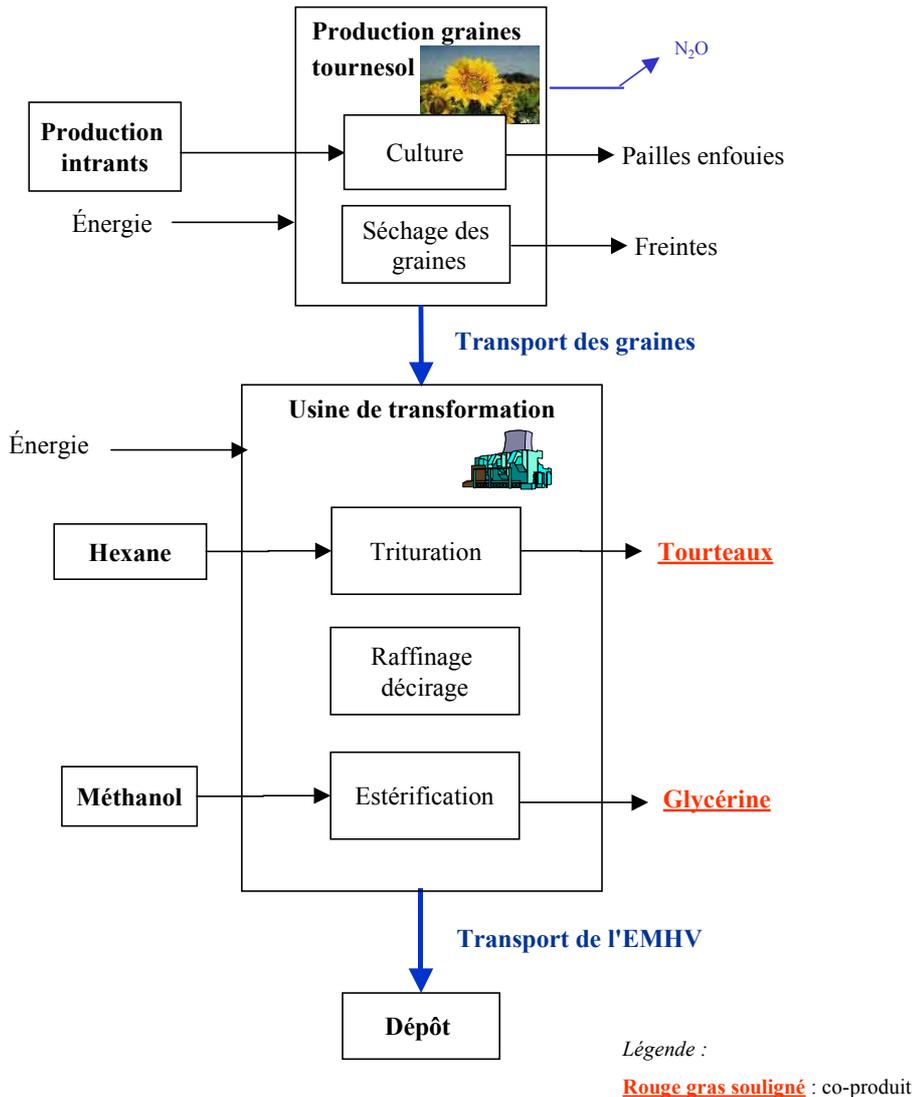


Figure 5 : Filière de production de l'huile de tournesol et de l'EMHV

²⁶ La valeur a été reprise à partir de données de l'étude ONIDOL de 1993 " Ecobilan du diester de colza", en supposant que l'EMHV de tournesol a le même contenu énergétique. La valeur retenus correspond à la valeur prise en compte par l'ONIDOL en 1993. Lors de l'actualisation de 1999, l'ONIDOL a retenu une valeur légèrement différente, de 37.5 MJ/kg.

8.1.3 Sources de données

⇒ Intrants agricoles :

- Semences : non prises en compte.
- Engrais et phytosanitaires: les sources utilisées pour la prise en compte de leur fabrication correspondent une étude de l'ITCF, en 1993 : "Etudes des systèmes de cultures optimisant le bilan énergétique".

⇒ **Itinéraires techniques et travaux culturaux, rendements de culture** : les données ont été fournies par le CETIOM en 1995.

Les dépenses énergétiques de stockage et séchage des graines sont reprises de l'étude ONIDOL de 1993 " Ecobilan du diester de colza".

⇒ **Trituration des graines, Raffinage, Estérification** : les données sont reprises de l'étude ONIDOL de 1993 " Ecobilan du diester de colza", avec ajout d'une étape supplémentaire : le décirage. Pour cette étape, les données ont été fournies par SOFIPROTEOL.

⇒ **Les différents transports** : les données sont reprises de l'étude ONIDOL de 1993 " Ecobilan du diester de colza".

8.1.4 Choix méthodologiques

L'étude effectue un bilan énergétique, sans évaluation des gaz à effet de serre. Il n'y a donc pas eu de choix en matière de modélisation du carbone biomasse.

Concernant les coproduits, comme pour le colza, la filière tournesol produit des tourteaux ainsi que de la glycérine. L'étude reprenant les bilans énergétiques de l'étude colza, et de fait, la règle d'imputation a été reprise. Elle correspond donc à une **imputation massique**. Cependant, cette imputation s'effectue selon le bilan massique de la filière colza.

Or, le bilan massique de la transformation des graines de tournesol en EMHV semble très légèrement différent de celui du colza pour l'étape de trituration des graines, à savoir :

- pour le colza : 45.6% d'huile + 54.4% de tourteaux
- pour le tournesol : 44% d'huile + 56% de tourteaux

Le bilan massique pour l'estérification est en revanche très voisin pour les deux filières.

8.1.5 Valeurs énergétiques et gaz à effet de serre pour chacune des étapes

⇒ Intrants agricoles :

- **Semences** : 3 à 4 kg par hectare, négligées dans l'étude.
- **Engrais** :

Les apports d'engrais sont variables. Le Tableau 12 propose des valeurs de référence d'apport en fertilisants pour différents itinéraires techniques.

La dépense énergétique retenue dans l'étude pour la production des engrais est de 50 MJ / kg d'engrais azoté apporté, 10 MJ / kg de P₂O₅ et 7 MJ / kg de K₂O.

Régions	Midi-Pyrénées	Poitou-Charente	Centre
Rendements (q/ha)	19	21	20
Fertilisation (kg/ha)	kg de fertilisant appliqué à l'ha		
Azote	60	40	40
P ₂ O ₅	24.7	27.3	26
K ₂ O	15.2	16.8	16

Tableau 12 : fertilisation selon différents itinéraires techniques de production de tournesol

Cependant, pour le P₂O₅ et le K₂O, l'étude ne tient compte que des exportations hors de la parcelle (indépendantes des apports en engrais) : 1.3 kg de P₂O₅ et 0.8 kg de K₂O par quintal de tournesol.

• **Phytoprotecteurs :**

Les quantités de produits phytoprotecteurs appliquées, selon différents itinéraires techniques, sont présentées dans le Tableau 13.

De plus, la dépense énergétique moyenne de production des phytoprotecteurs est reprise de l'étude ONIDOL, soit 157 MJ / kg de matière active.

Régions	Midi-Pyrénées		Poitou-Charente		Centre	
Protection phytoprotecteur	kg de matières actives appliquées ha (ramené au % de surface traitée)					
	min	max	min	max	min	max
Dés herbants	1.6	3	3	3	3	3
Antilimace	0.05	0.14	0.07	0.2	0.06	0.2
Fongicide	0.2	0.4	0.12	0.12	0.12	0.12
Insecticide	0	0	0.045	0.045	0.045	0.045
Traitement du sol	0.020	0.020	0.400	0.400	0.675	0.675
Fourchette	1.87	3.56	3.635	3.765	3.9	4.04
Moyenne total produits	2.72		3.70		3.97	

Tableau 13 : protection phytoprotecteurs selon différents itinéraires techniques de production du tournesol

⇒ **Travaux culturaux :**

La consommation de gazole liée aux travaux culturaux a été prise en compte en tenant compte des consommations spécifiques aux types de travaux effectués, et aux nombres de passages nécessités par les itinéraires techniques. Le Tableau 14 résume les valeurs retenues dans l'étude.

Elaboration des bilans énergétiques des filières de
production de biocarburants
Synthèse des données disponibles

Régions	Midi-Pyrénées		Poitou-Charente		Centre	
Rendements (q/ha)	19		21		20	
Etapes culturales	nb passages	carburant en l.	nb passages	carburant en l.	nb passages	carburant en l.
Déchaumage	0	0	1	11	1	11
Labour	1	16	1	16	1	16
Préparation	1	12	1	12	1	12
Traitement	5	10	4	8	5	10
Récolte + broyage	1	38	1	38	1	38
total carburant utilisé	76		85		87	

Tableau 14 : consommations de gazole liées au passage d'outil pour différents itinéraires techniques de production du tournesol

Ces calculs ont été effectués sur la base des consommations suivantes, auxquelles 10% sont ajoutés pour l'accès à la parcelle :

Matériel – Etape de culture	l/ha
Cover-crop (déchaumage)	11
Labour	16
Préparation + Semis	12
Traitements	2
Broyage	15
Récolte (avec broyage)	23

L'étude tient également compte du coût énergétique de l'amortissement du matériel, estimé à partir du poids du matériel divisé par la surface moyenne de l'exploitation et sa durée de vie. En moyenne, il a été estimé à **1100 MJ/ha**.

De plus, l'étude tient compte de la dépense énergétique durant le séchage et le stockage des graines : 168 MJ d'électricité par tonne de graines.

⇒ **Rendement de culture**: les rendements sont spécifiques pour chacun des itinéraires techniques décrits pour chacune des trois principales régions de production du tournesol en France : Midi-Pyrénées, Poitou-Charente et la région Centre.

Les rendements retenus sont de :

- **19 quintaux** par hectare pour l'itinéraire technique de la région Midi-Pyrénées;
- **21 quintaux** par hectare pour l'itinéraire technique de la région Poitou-Charente;
- **20 quintaux** par hectare pour l'itinéraire technique de la région Centre.

⇒ **Trituration des graines, Raffinage, Estérification** : la quantité de diester obtenu après transformation d'un quintal de tournesol est supposée constante dans cette étude. La variabilité de la qualité des graines n'a pas été prise en compte : il a été considéré que les graines de tournesol contiennent 44% d'huile brute.

Le bilan s'établit comme suit :

1 tonne de graines de tournesol + x (?) kg d'hexane -> **440 kg d'huile brute** + **560 kg de tourteaux**

Il est supposé qu'une tonne d'huile brute correspond à une tonne d'huile raffinée.

Le diester est élaboré à partir d'huile de tournesol par transestérification, procédé mis au point par l'IFP : le processus est synthétisé dans la relation suivante :

1.015 t d'huile raffinée + 0.11 t de méthanol -> 1 tonne d'EMHV + 0.1 t de glycérine + 0.025 t d'acides gras

Le bilan global à partir du tournesol, sans prise en compte des consommables est donc :

1 tonne graines tournesol -> 0.433 t EMHV + 0.56 t tourteaux + 0.043 t glycérine

Concernant les consommations énergétiques de la trituration, du raffinage et de l'estérification de l'huile de tournesol, le traitement des graines et de l'huile de tournesol est tout à fait comparable à celui du colza à l'exception de l'étape de raffinage. En effet, l'huile de tournesol nécessite un décirage supplémentaire (6 MJ / q). Aussi, les données sont reprises de l'étude ONIDOL de 1993.

Selon les hypothèses de l'étude, la dépense énergétique relative à cette filière ne dépend que du rendement.

Le Tableau 15 présente les montants de la mobilisation énergétique pour ces étapes de transformation industrielle.

<i>Etapes</i>	Energie consommée		Sources bibliographiques
	MJ/ q tournesol	MJ/ kg diester	
Trituration + production d'hexane	130	1	Rapport ONIDOL 1993
Raffinage + décirage	22	0,56	Rapport ONIDOL 1993 complété par une communication personnelle SOFIPROTEOL
Estérification	130	3	Rapport ONIDOL 1993
Production de méthanol	161	4	Rapport ONIDOL 1993
Transports :			
- Champs – usines	21	0,2	Rapport ONIDOL 1993
- Usine – dépôt pétrolier	2	0,05	
Total filière industrielle	466	8,81	

Tableau 15 : consommations énergétiques de la transformation des graines de tournesol en EMHV

⇒ **Les différents transports** : les transports ont été décrits dans le tableau précédent.

8.1.6 Principales conclusions de l'étude

L'étude propose un calcul de bilan énergétique pour chacun des trois itinéraires techniques identifiés.

L'un des rapports énergétiques proposé correspond à la valeur énergétique de l'EMHV, divisée par le coût énergétique des filières agricoles et industrielles ayant permis sa synthèse. Le rapport varie alors entre 1.8 (région Midi-Pyrénées) et 2 (région Poitou Charentes).

Ce ratio semble bien correspondre au même ratio utilisé pour les filières EMHV de colza et ETBE de betterave, sous réserve que le CETIOM ait toujours raisonné dans son étude en énergie primaire, ce qui mériterait validation (par exemple, il est difficile de valider le fait que les consommations d'énergie pour le décirage aient bien été comptabilisées en énergie primaire).

Par ailleurs, l'étude constate que le bilan énergétique est très fortement influencé par les rendements, et dans une moindre mesure par la charge en azote de synthèse.

Dans la partie agricole, les consommations de carburant représentent également une importante part de la mobilisation énergétique.

L'étude cherche ensuite à optimiser les rendements et les apports en azote sur tournesol en fonction des bilans énergétiques calculés.

8.1.7 Améliorations

Cette étude constitue une première base de référence devant être valorisée dans le cadre de l'étude ADEME-DIREM.

Cependant, certaines actualisations ou adaptations doivent être envisagées :

- la reprise et l'adaptation des **valeurs 99** de l'étude ONIDOL, au lieu des valeurs 93.

- la validation du fait que la **règle d'imputation massive** appliquée par l'ONIDOL sur le colza a été reprise à bon escient par le CETIOM pour la filière tournesol.
- **L'identification** de l'ensemble des émissions de **gaz à effet de serre**, qui n'ont pas été abordées dans l'étude CETIOM. Là encore, il s'agira de s'appuyer sur l'étude ONIDOL de 99.
- **Concernant l'amont agricole**, il est important de définir et valider le choix d'un itinéraire technique, en cohérence avec les pratiques actuelles. Les données de l'étude sur les "références pour le calcul des bilans énergétiques de productions agricoles" méritent vraisemblablement d'être utilisées dans le cadre de l'étude ADEME-DIREM.

Il importe également de valider la part d'irrigation en France sur les cultures de tournesol, afin d'intégrer l'irrigation dans le bilan de la filière.

Il importe également de valider et de préciser avec le CETIOM la nature et les quantités en éléments P et K (et non pas N) qui sont exportées hors de la parcelle, et qui sont décrits dans l'étude.

- Concernant l'étape de **décirage**, il conviendra de valider si les valeurs CETIOM correspondent effectivement à une équivalence en énergie primaire, ou bien s'il s'agit de consommations mesurées au compteur. La nature des énergies utilisées à cette étape sera également importante à valider.
- Concernant les **transports**, la définition d'un scénario moyen représentatif de la filière huile et EMHV de tournesol en France est nécessaire. L'ensemble des distances et des modes de transports décrits devra être validé par le comité de pilotage.

9 PRODUCTION DE MTBE

L'étude réalisée en 1996 pour la CGB et le SNPAA ("Ecobilan de l'ETBE de betteraves – Comparaison avec le MTBE – 1996") propose des valeurs pour la production de MTBE.

Dans l'étude, les frontières du système pour la filière MTBE incluaient l'entretien d'une jachère longue, afin de produire des résultats comparables avec les frontières du système ETBE.

La synthèse de MTBE se déroule en trois étapes majeures:

- production de méthanol
- production d'une coupe isobutène
- éthérification et obtention du MTBE

⇒ Production de méthanol

La production de méthanol s'effectue dans 90% des cas par oxydation partielle du gaz naturel à basse pression. Les données de production prises en compte sont exclusivement issues de la bibliographie "Procédés de pétrochimie", édité aux éditions Technip par l'IFP.

Le bilan de la production de méthanol est le suivant :

0.74 kg gaz naturel -> 1 kg méthanol

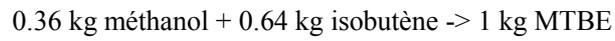
Les besoins en énergie pris en compte semblent faibles : 6 kg de vapeur par tonne de méthanol produit, et 63 kWh d'électricité issue du réseau.

⇒ **Production d'une coupe isobutène** : les données sont identiques à celles utilisées dans la filière ETBE. Elles ont été fournies par l'IFP. Elles correspondent à une production d'isobutène dans un four de craquage catalytique, en 1994.

⇒ **Production de MTBE :**

La synthèse de MTBE s'avère semblable à celle d'ETBE.

Le bilan est le suivant :



Cette réaction mobilise 0.91 kg de vapeur à 50 bars, et 0.015 kWh d'électricité.

⇒ **Les différents transports :**

Le gaz naturel est transformé en méthanol sur son lieu d'extraction. Il est supposé être ensuite transporté sur 3900 km, dont 3500 km de transport maritime et 400 km de transport terrestre.

Il s'agit de la distance moyenne d'approvisionnement de l'unité d'éthérification d'ELF à Feyzin.

10 PRODUCTION DES CARBURANTS CLASSIQUES : ESSENCE ET GAZOLE.

10.1 Données bibliographiques ETH Zürich, 1996

L'office fédéral de l'énergie, en collaboration avec l'Université de Zürich (Eidgenössische Technische Hochschule ETH) a publié des données d'inventaire de cycle de vie pour différentes ressources énergétiques. Ces données font foi dans le domaine de l'ACV et sont généralement reprises pour intégrer les impacts de production et d'utilisation des ressources énergétiques dans les différentes études ACV.

Cependant, ces données sont produites, dans la plupart des cas, pour correspondre au cas de la Suisse, ou bien au cas moyen européen. Elles sont rarement détaillées par pays.

Ces documents fournissent en particulier les inventaires de cycle de vie sur la production d'essence sans plomb et sur la production de gazole, sur la base d'une moyenne représentative de la situation européenne en 1994. Les sources de données primaires sur lesquelles ETHZ s'appuie sont issues de la bibliographie, publiée par Schmidt et al 1981, mais aussi Barlow 1991, Sittig 1978, Fabri et al. 1991, RSO 1996, Concawe 1994, De Luchi 1991.

Dans ETHZ, la règle d'imputation entre les différents produits au sein de la raffinerie est une règle **d'imputation massique**.

Les résultats des inventaires agrégés pour les étapes amont d'extraction et la phase de raffinage de l'Essence et du Gazole sont présentés dans le Tableau 16 pour la filière Essence et dans le Tableau 17 pour la filière Gazole.

Bilan énergétique	Energie Feedstock	40.82 MJ
	Energie Fuel	11.29 MJ
	Energie non renouvelable	52.04 MJ
	Energie renouvelable	0.06 MJ
	Energie primaire totale	52.10 MJ
Bilan gaz à effet de serre	CO ₂ fossile	664.87
	CH ₄	4.750 g
	N ₂ O	0.004 g

Tableau 16 : Bilan de l'inventaire agrégé de la production d'un kilogramme d'Essence sans plomb
(source donnée : ETH, pages 171-173 pour la phase de raffinage)

Bilan énergétique	Energie Feedstock	42,79 MJ
	Energie Fuel	3,31 MJ
	Energie non renouvelable	46,08 MJ
	Energie renouvelable	0,02 MJ
	Energie primaire totale	46,11 MJ
Bilan gaz à effet de serre	CO ₂ fossile	311,097g
	CH ₄	4.546 g
	N ₂ O	0.003g

Tableau 17 : Bilan de l'inventaire agrégé de la production d'un kilogramme de Gazole (source donnée : ETH, pages 171-173 pour la phase de raffinage)

10.2 Argonne National Laboratory – Transportation Fuel Model (Greet Model)

10.2.1 Présentation de l'outil

Plusieurs études menées par Michael Wang, Argonne National Laboratory, visent à établir des bilans énergétiques et gaz à effet de serre de différents carburants. Le modèle GREET (Greenhouse Gases, Reg Emissions, and Energy Use in Transportation) a notamment été développé en 1996, et actualisé en 2001. Ce modèle permet de calculer la consommations totale d'énergie, la consommation d'énergie fossile au cours des différentes étapes du cycle de vie, d'établir un bilan des émissions de gaz à effet de serre (principalement CO₂ et N₂O) et d'autres émissions atmosphériques telles que les composés organiques volatiles, le CO, les oxydes d'azote.

Cet outil de calcul permet d'évaluer différents types de carburants classiques et biocarburants.

10.2.2 Bilan énergétique des carburants classiques

Une partie de l'outil concerne en particulier le bilan énergétique des étapes amonts du cycle de vie des carburants classiques à savoir les étapes d'extraction et de raffinage des carburants classiques. Les données suivantes sont issues du modèle de calcul :

	Essence conventionnelle	Gazole conventionnel
énergie auto-consommée	224 691 Btu/mmBtu ²⁷ : 22,5%	160 219 Btu/mmBtu : 16%
densité	2791 g/gal ²⁸ : 0,74 kg/L	3240 g/gal : 0,86 kg/L
PCI	115 500 Btu/gal : 43,66 MJ/kg	128 500 Btu/gal : 41,84 MJ/kg

Concernant ces produits pétroliers, la règle d'imputation des co-produits au sein de la raffinerie n'a pu être identifiée précisément dans les documents, mais est énergétique, d'après les interviews menées par l'IFP auprès de M. Wang.

²⁷ Btu : British Thermal Unit : 1 Btu = 1 054,8 Joule ; mmBtu = 10⁶ Btu

²⁸ Gallon : 1 gal US = 3,785 litre

10.3 Présentation des données proposées et calculées par l'IFP pour la production d'essence et de diesel en France

La filière de production des carburants pétroliers peut être décomposée en quatre étapes principales :

1. la production,
2. le transport,
3. la raffinerie
4. et la distribution.

10.3.1 La production

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 consommation d'énergie nécessaire à la production du pétrole brut.

⇒ Le torchage des gaz associés :

Longtemps considéré comme produit peu valorisable, le gaz naturel co-produit sur les champs pétrolier a longtemps été directement brûlé sur place à l'aide de torche. Depuis 25 ans cette pratique s'est largement réduite comme le montre la figure ci-dessous.

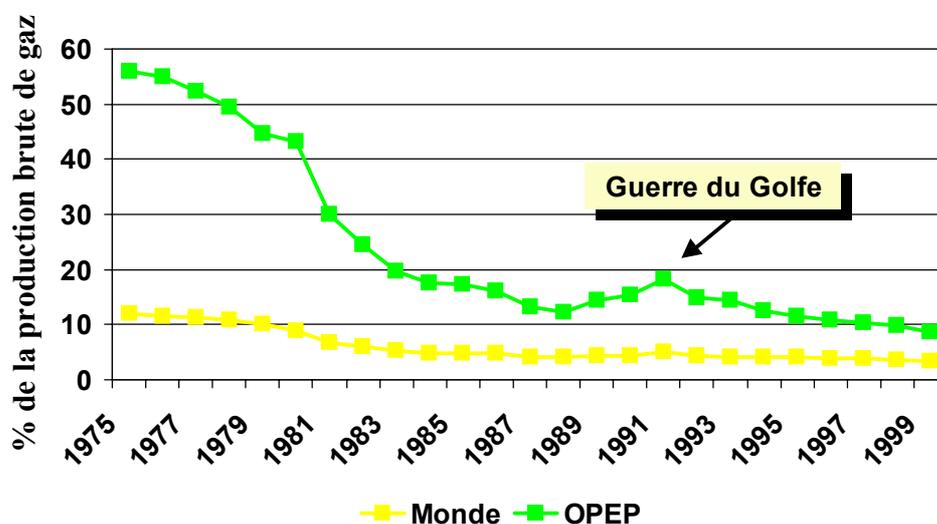


Figure 6 : production de pétrole : évolution du volume de gaz brûlé en % de la production brute de gaz

Le volume de gaz naturel brûlé par tonne de pétrole brut importé en France a été évalué en calculant les moyennes pondérées par les volumes de pétrole brut importé et les volumes de gaz naturel brûlé par tonne de pétrole brut produit sur chaque grande zone (cf. Tableau 18).

Elaboration des bilans énergétiques des filières de
production de biocarburants
Synthèse des données disponibles

	Importations en France (10 ⁶ t)	%	Volume brûlé en m ³	Production pétrolière par an	m ³ GN torché / t. brut produit	m ³ t. de GN brûlé moyen pondéré par le % de la Qté importée
Proche Orient	31 608	37%				
dont Arabie Saoudite	15 226	19%	0,31	410,30	0,76	0,14
Irak	7 219	9%	0,95	125,60	7,56	0,67
Iran	5 176	6%	10,50	175,20	59,93	3,81
Koweït	1 374	2%	0,50	99,30	5,04	0,08
Syrie	2 507	3%	0,41	30,30	13,53	0,42
Afrique du Nord	6 246	7%				
Dont Algérie	3 440	4%	6,65	63,90	104,07	4,39
Libye	2 441	3%	1,77	68,00	26,03	0,78
Afrique Noire	7 552	9%				
dont Gabon/Congo	337	0%	3,18	31,50	100,95	0,42
Nigeria	4 844	6%	18,85	99,90	188,69	11,21
Mer du nord	31 892	37%				
dont Grande Bretagne	9 898	12%	2,10	136,60	15,37	1,87
Norvège	21 141	26%	0,66	149,40	4,42	1,15
CEI (ex-URSS)	7 898	10%	7,10	369,90	19,19	1,86
Autres origines	431	0%				
Total	85 627	100%	52,98	1 759,90	545,54	26,80

Tableau 18 : Evaluation des volumes de gaz naturel brûlés sur champs pétroliers

Sources : « BP statistical review 2001 », « Natural Gas in the World, 2000 Survey Cedigaz ».

Les consommations d'énergies et les émissions de CO₂ sont ensuite déduits à partir des PCI du méthane.

⇒ **la consommation d'énergie nécessaire à la production du pétrole brut :**

La consommation d'énergie nécessaire au traitement du brut sur champ (désablage, séchage, réchauffage, ...) est estimée entre 1% à 2% de la demande en pétrole. Cette énergie est produite par combustion de méthane.

Source : IFP, BP, GREET (Argonne National Laboratory)

10.3.2 Transport

Pour estimer les consommations d'énergies et les émissions de gaz à effet de serre liées à l'étape du transport, il est nécessaire de distinguer le pétrole russe acheminé par pipeline et le pétrole importé d'autres régions du monde transporté par tanker.

⇒ **Le cas du pétrole russe :**

Le pétrole russe est acheminé vers la France par le pipeline « Druzha » qui traverse le pays et parcourt ensuite l'Europe de l'Est. La distance totale parcourue depuis les champs d'extraction jusqu'aux raffineries françaises a été estimée à 3 132 km. Les consommations d'énergies liés à cette opération sont en cours d'actualisation.

Source : *The oil industry of the former soviet union, Reserves, prospects, extraction and transportation*, N.A Krylov, A.A Bokserman, E.R Stavrovsky, 1998.

⇒ **Le cas des autres pays :**

Dans le cas où le pétrole brut est transporté par tanker jusqu'en France, on peut distinguer trois étapes majeures : le transport vers le port de chargement, le transport du port pétrolier du pays exportateur au port pétrolier français et enfin le transport du port pétrolier en France jusqu'à la raffinerie.

- Le transport vers le port de chargement

Deux modes d'approvisionnement des ports pétroliers sont envisageables suivant que le champ est situé en mer ou à terre. Dans le premier cas, le brut est acheminé par des oléoducs « off-shore » dont la distance moyenne a été estimée à 140 km. En ce qui concerne le second, la distance des oléoducs « on-shore » a été évaluée à 340 km. Les consommations d'énergie associée à ce type de transport sont en cours d'évaluation.

	Kilométrage d'oléoducs on-shore (km)	Kilométrage d'oléoducs off-shore (km)	Qté de pétrole exportée en France (milliers de tonnes)
Proche-Orient	306	55	31 608
Afrique	406	45	13 798
Mer du Nord	-	266	31 892
Total kilométrage pondéré à la quantité de pétrole exportée	336	140	

Tableau 19 : Distance moyenne des oléoducs "on-shore" et "off-shore" des zones d'extraction jusqu'au port pétrolier du pays exportateur.

Source : petroconsultant

Eléments statistiques du CPDP, 2000

- Le transport du port pétrolier exportateur au port pétrolier français

Le parcours se fait par tankers pétroliers. La distance moyenne séparant deux ports a été évaluée en calculant une moyenne pondérée des distances parcourues par les navires par les quantités de brut transportées. Cette distance moyenne a été estimée à 6 370 km. La consommation des tankers rapportée à la quantité de brut transporté permettra par la suite de connaître les consommations d'énergie et les quantités de CO₂ rejetées. Ces valeurs sont en cours d'actualisation.

	quantités importées en milliers de tonnes	Equivalent %	provenance	Distance moyenne port d'embarquement - port de déchargement (km)	Kilométrage pondéré au prorata de la quantité de brut transportée
Proche-Orient	31608	36%	Golfe persique méditerranée orientale	11991,70	4324,30
dont: Irak	7219	8,24%			
Iran	5176	5,91%			
Koweït	1374	1,57%			
Syrie	2507	2,86%			
Arabie-Sahoudite	15226	17,37%			
Afrique	13798	16%	Mer du nord Afrique du Nord Afrique occidentale	7838,68	1233,95
dont: Algérie	3440	3,92%			
Libye	2441	2,78%			
Nigeria	4844	5,53%			
Congo/Gabon	337	0,38%			
Mer du Nord	31892	36%	Mer du nord	2221,94	808,45
dont: Grande-Bretagne	9898	11,29%			
Norvège	21141	24,12%			
TOTAL EXPORTE	87652				6367

Tableau 20 : Evaluation des distances moyennes de transports pour le pétrole brut importé en France

Source : Eléments statistiques du CPDP, 2000

- Le transport du brut en France du port pétrolier jusqu'à la raffinerie

Le transport du brut se fait essentiellement par oléoducs. La distance moyenne parcourue par oléoduc du port pétrolier à la raffinerie a été évaluée à 222,8 km. La consommation énergétique pour ce type de transport est de $4,24 \cdot 10^{-3}$ kWh_e/ tonne de brut transportée/ km.

Source : *Eléments statistiques du CPDP, 2000.*

Société du Pipeline Sud-Européen

Raffineries	Origine port pétrolier	Longueur des pipes (km)	débit en Mt/an
Flandres	Dunkerque	négligeable	
Gonfreville	Le havre-Antifer	35,6	30
Port-jérôme	Le havre-Antifer	63	17,75
Petit-couronne	Le havre-Antifer	103	22,83
Gravenchon	Le havre-Antifer	62	13,6
Grandpuits	Le havre-Antifer	279	11,5
Donges	Nantes-Saint-Nazaire	négligeable	
Provence / La Mède	Fos-Marseille	9,5	4,8
Berre	Fos-Marseille	25	12,4
Lavéra	Fos-Marseille	négligeable	
Fos-sur-mer	Fos-Marseille	négligeable	
Feysin	Fos-Marseille	260	7,8
Reichstett	Fos-marseille	714	32,4
Total pondéré en fonction du débit brut		223	

Tableau 21 : Evaluation des distances moyennes de transports du port pétrolier à la raffinerie

Source : *Eléments statistiques du CPDP, 2000*

10.3.3 3. Le raffinage

Pour évaluer les consommations d'énergie ainsi que les émissions de gaz à effet de serre liées au raffinage des produits, un modèle de programmation linéaire représentatif de la raffinerie française moyenne va être utilisée.

L'IFP développe un modèle de raffinage représentant les principaux procédés de séparation et de traitements depuis de nombreuses années. Chaque unité est ainsi considérée sous un aspect technique (**rendements massiques**, utilités, propriétés des produits) et économique (coût opératoire, coûts d'investissements), en fonction des conditions opératoires retenues et de la nature de la charge. Le modèle se caractérise également par un jeu variable de paramètres, parmi lesquels peuvent être cités, à titre d'exemple : la nature et le coût de l'approvisionnement, les capacités de traitement, l'horizon considéré (i.e. possibilités d'investissements ou non), les prix, la demande et les spécifications des produits finis, ...

La résolution du modèle de raffinage est obtenue par programmation linéaire sur la base de critères économiques (optimisation de la fonction économique). Les principaux résultats sont typiquement : le coût global de traitement, la nature et les quantités de charge à traiter dans chaque unité, la composition des produits finis et leur coûts marginaux... Les émissions de CO₂ peuvent être calculées a posteriori, à partir du bilan combustible, au niveau global de la raffinerie ou encore pour chaque produit en fonction de la composition de leur pool. Dans ce dernier cas, la méthode du prorata massique, couplée ou non à la notion de produits utiles, est la plus fréquemment utilisée. Le recours au prorata énergétique, pour une complexité accrue (nécessité de recalculer systématiquement le PCI moyen de chaque pool avec les incertitudes associées), n'apporterait pas de changements significatifs. Il faut par ailleurs ajouter que le modèle optimise la fonction économique sur la base de rendement massique et non pas énergétique, le coût des produits étant en général connu en masse. Le prorata massique semble donc en conséquence le plus pertinent.

⇒ **Présentation succincte du modèle :**

- les variables du modèle sont les variables de flux (quantités à traiter dans chaque unités) ;
- les principales contraintes sont les capacités de traitement, les spécifications (notamment indices d'octane recherche et moteur, teneur en soufre, en benzène, en aromatiques, en oxygène des essences ; indice de cétane, teneur en soufre et en polyaromatiques du gazole moteur...) et les demandes en produits pétroliers (GPL, Naphta, Essences, Gazole moteur, Fuel domestique, Fuels lourds, bitume) ;
- l'approvisionnement français est constitué d'une cinquantaine de pétrole brut différents. Or la taille d'un modèle de programmation linéaire est à peu près proportionnel au nombre de bruts modélisés. C'est pourquoi, le modèle IFP ne fait référence qu'à trois types de pétroles bruts correspondants aux trois familles les plus répandues, et auxquelles sont assimilées les différents bruts réellement traités. Ces trois bruts de référence sont le Brent brut léger (c'est à dire à degré API élevé) et peu soufré, l'Arabe Léger (brut moyen, moyennement soufré) et l'Arabe Lourd (lourd et soufré). Les catégories auxquelles appartiennent les pétroles bruts retenus (brut léger peu soufré, brut moyen moyennement soufré et brut lourd soufré) représentaient près de 80% de l'approvisionnement français en 1998.

Brut	° API	%S	Type
Brent	37	0,3	Léger très peu soufré
Arabe Léger	33	1,9	Moyen moyen soufré
Arabe lourd	27	2,7	Lourd soufré

Tableau 22 : Principales caractéristiques des pétroles utilisés dans le modèle de programmation linéaire de l'IFP

⇒ **Transport des carburants des raffineries aux dépôts :**

Le terme carburant englobe les supercarburants sans plomb et le gazole. 70 % des carburants sortant des raffineries sont acheminés vers les dépôts régionaux majoritairement par oléoducs. La distance moyenne parcourue par oléoduc entre une raffinerie et son dépôt a été évaluée à 153 km. La consommation énergétique de ces oléoducs est de 0.0139 kWh_e/ tonne transportée/ km.

Source : Eléments Statistiques du CPDP, 2000

Société du Pipeline Méditerranée-Rhône

	Capacité de stockage totale (*1000 m ³)	%	Distance moyenne par réseau de la raffinerie vers les dépôts (km)	Distance moyenne de la raffinerie vers les dépôts au prorata de la qté stockée (km)
Réseau TRAPIL	2485	37%	94	35
Réseau ODC	1845	28%	113	31
Réseau PMR	1601	24%	192	46
Réseau DMM	756	11%	366	41
TOTAL	6687	100%		153

Tableau 23 : Estimation des distances entre la raffinerie et les dépôts régionaux.

Source : Eléments Statistiques du CPDP, 2000

Société du Pipeline Méditerranée-Rhône

11 GLOSSAIRE

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

AGPB : Association des Producteurs de Blé

AGPM : Association des Producteurs de Maïs

CETIOM : Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains

CGB : Confédération Générale des Planteurs de Betteraves

FCB : Fédération des Coopératives de Betterave

le groupe PLANETE

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

ITB : Institut Technique de la Betterave

ITCF : Institut Technique des Céréales et Fourrages

ONIDOL : Organisation Nationale Interprofessionnelle des Oléagineux

SESSI : Service des Statistiques Industrielles

SNIE : Syndicat National de l'Industrie des Engrais

SNPAA : Syndicat National des Producteurs d'Alcools Agricoles

SOFTDEAL.