
Analyse des procédés de première génération de transformation de la biomasse en carburants liquides

Aux États-Unis y'a du pétrole, mais nous on a les betteraves
Aux Émirats y'a du pétrole, mais nous on a les betteraves
Les Fatals Picards, *Picardia Indipendenza*, 2005

Table des matières

I. Méthodologie d'analyse.....	99
I.1. Approche appliquée.....	99
I.2. Analyse Énergétique des Procédés.....	101
I.3. Variantes de procédés étudiées.....	103
a) <i>Variantes technologiques.....</i>	<i>103</i>
b) <i>Valorisation des co-produits.....</i>	<i>103</i>
II. Description des procédés.....	105
II.1. Filières de production d'éthanol.....	105
a) <i>Étapes communes de production d'éthanol.....</i>	<i>105</i>
b) <i>Éthanol ex betterave.....</i>	<i>106</i>
c) <i>Éthanol ex canne à sucre.....</i>	<i>108</i>
d) <i>Éthanol ex blé.....</i>	<i>109</i>
II.2. Filières de production d'EMHV.....	111
a) <i>Trans-estérification des huiles végétales.....</i>	<i>111</i>
b) <i>EMHV ex colza.....</i>	<i>112</i>
II.3. Voies de valorisation des co-produits.....	114
a) <i>Substitutions étudiées.....</i>	<i>114</i>
b) <i>Amendement agricole.....</i>	<i>115</i>
c) <i>Alimentation animale.....</i>	<i>115</i>
d) <i>Substitution de substances chimiques synthétiques.....</i>	<i>116</i>
e) <i>Combustible solide.....</i>	<i>116</i>
f) <i>Méthanisation.....</i>	<i>116</i>
III. Données et bases théoriques de simulation des opérations unitaires et des calculs d'ACV	118
III.1. Hypothèses générales et données des corps purs.....	118
III.2. Hypothèses et données relatives aux calculs d'ACV.....	119
III.3. Chauffage et refroidissement.....	119
III.4. Compression de vapeur.....	120
III.5. Fermentation.....	120
III.6. Distillation.....	120
III.7. Évaporation.....	122
III.8. Séchage.....	123
a) <i>Sécheur à air par entraînement.....</i>	<i>123</i>
b) <i>Sécheur par vapeur d'eau surchauffée.....</i>	<i>123</i>
IV. Résultats de simulation et d'ACV des procédés.....	125
IV.1. Production d'éthanol à partir de betterave.....	125
a) <i>Résultats du scénario de référence.....</i>	<i>125</i>
b) <i>Analyse du scénario de référence et identification des variantes d'intérêt.....</i>	<i>126</i>
c) <i>Résultats d'ACV des scénarios d'étude.....</i>	<i>128</i>
IV.2. Production d'éthanol à partir de blé.....	128
a) <i>Résultats du scénario de référence.....</i>	<i>128</i>

<i>b) Analyse du scénario de référence et identification des variantes d'intérêt.....</i>	<i>129</i>
<i>c) Résultats d'ACV des scénarios d'étude.....</i>	<i>131</i>
IV.3. Production d'éthanol à partir de canne à sucre.....	131
IV.4. Production d'EMHV à partir de colza.....	132
IV.5. Intérêt des variantes vis-à-vis des filières globales.....	133
<i>a) Filière d'éthanol issu de betterave.....</i>	<i>133</i>
<i>b) Filière d'éthanol issu de blé.....</i>	<i>135</i>
<i>c) Filière d'EMHV issu de colza.....</i>	<i>136</i>
V. Analyse des coûts de production des carburants végétaux.....	138
V.1. Structure des coûts de production.....	138
<i>a) Coûts d'investissement.....</i>	<i>138</i>
<i>b) Coûts d'exploitation.....</i>	<i>138</i>
<i>c) Valorisation des co-produits.....</i>	<i>139</i>
V.2. Marché de l'énergie.....	139
V.3. Marché des produits agricoles.....	140
V.4. Analyse des résultats de coûts de production.....	142
<i>a) Production d'éthanol à partir de blé.....</i>	<i>142</i>
<i>b) Production d'éthanol à partir de betterave.....</i>	<i>143</i>
<i>c) Production d'EMHV à partir de colza.....</i>	<i>144</i>
Conclusion.....	146

Index des figures

Figure III.1 - Répartition des besoins énergétiques des procédés de transformation de la betterave, du blé et du colza, selon l'étude JRC '15 [42].....	99
Figure III.2 - Schématisation de la méthodologie d'analyse des procédés du présent chapitre.....	100
Figure III.3 - Exploitation des courbes composites.....	102
Figure III.4 - Grande courbe composite.....	102
Figure III.5 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de betterave en période de campagne.....	108
Figure III.6 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de betterave en période d'inter-campagne.....	108
Figure III.7 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de canne à sucre.....	109
Figure III.8 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de blé.....	111
Figure III.9 - Réaction de trans-estérification d'un triglycéride par le méthanol.....	112
Figure III.10 - Fonctionnement schématique du procédé de production d'EMHV à partir de colza.....	114
Figure III.11 - Schéma de fonctionnement de la distillation d'un mélange eau / éthanol.....	121
Figure III.12 - Exemple de détermination graphique du taux de reflux minimum selon la méthode de Mac Cabe et Thiele.....	122
Figure III.13 - Courbes composites du procédé de référence de production d'éthanol à partir de betterave, en période de campagne.....	127
Figure III.14 - Courbes composites du procédé de référence de production d'éthanol à partir de blé.....	130
Figure III.15 - Courbes composites du procédé de référence de production d'éthanol à partir de canne à sucre.....	132
Figure III.16 - Intérêt des variantes étudiées pour les résultats globaux d'ACV de la filière d'éthanol de betterave.....	134
Figure III.17 - Intérêt des variantes étudiées pour les résultats globaux d'ACV de la filière d'éthanol de blé.....	135
Figure III.18 - Impact des variantes étudiées sur les résultats globaux d'ACV de la filière d'EMHV de colza.....	137
Figure III.19 - Corrélation entre le prix des engrais azotés et le prix du baril de pétrole, données constatées 2002-2007.....	139
Figure III.20 - Fluctuations des prix du blé et du tourteau de soja, période 1980-2007.....	140
Figure III.21 - Fluctuations des prix de la betterave et du blé, période 1980-2006.....	141
Figure III.22 - Fluctuations des prix du colza, du blé et du tourteau de soja, période 1980-2007.....	141
Figure III.23 - Évolution des coûts de production de l'éthanol de blé en fonction du prix du baril et pour un prix du blé fixé à 150 € / t.....	142
Figure III.24 - Cartographie de la compétitivité des filières d'éthanol issu de blé et d'essence en fonction du prix du baril et du prix du blé.....	143
Figure III.25 - Évolution des coûts de production de l'éthanol de betterave en fonction du prix du baril et pour un prix de la betterave fixé à 40€ / t.....	143
Figure III.26 - Cartographie de la compétitivité des filières d'éthanol issu de betterave et d'essence en fonction du prix du baril et du prix de la betterave.....	144
Figure III.27 - Évolution des coûts de production de l'EMHV de colza en fonction du prix du baril et pour un prix du colza fixé à 230€ / t.....	145
Figure III.28 - Cartographie de la compétitivité des filières d'EMHV issu de colza et de gazole en fonction du prix du baril et du prix du colza.....	145

Index des tables

Tableau III.1 - Extrait de liste des flux de chaleur de procédé, cas de référence de la production d'éthanol à partir de betterave en inter-campagne.....	101
Tableau III.2 - Composition moyenne de la racine de betterave.....	106
Tableau III.3 - Composition moyenne de la canne à sucre.....	108
Tableau III.4 - Composition moyenne du grain de blé.....	110
Tableau III.5 - Composition des graines de colza à la récolte, moyenne française 2004-2008.....	113
Tableau III.6 - Co-produits étudiés et voies de valorisation associées.....	114
Tableau III.7 - Teneurs en matières minérales des co-produits utilisés comme amendement agricole.....	115
Tableau III.8 - Impact des engrais de synthèse.....	115
Tableau III.9 - Données relatives à la prise en compte de la valorisation des co-produits en alimentation animale.....	116
Tableau III.10 - Pouvoir calorifique des co-produits.....	116
Tableau III.11 - Données relatives à la prise en compte de la méthanisation des co-produits.....	117
Tableau III.12 - Principales caractéristiques thermodynamiques de l'eau et de l'éthanol.....	118
Tableau III.13 - Caractéristiques employées relatives aux corps autres que l'eau et l'éthanol.....	119
Tableau III.14 - Impacts d'ACV associés à l'utilisation des sources d'énergie.....	119
Tableau III.15 - Besoins énergétiques et résultats d'ACV du scénario de référence de production d'éthanol à partir de betterave.....	125
Tableau III.16 - Définition des variantes technologiques d'étude du procédé de production d'éthanol à partir de betterave.....	127
Tableau III.17 - Définition des variantes de valorisation des co-produits du procédé de production d'éthanol à partir de betterave.....	127
Tableau III.18 - Résultats d'ACV relatifs à la consommation énergétique des scénarios de production d'éthanol à partir de betterave.....	128
Tableau III.19 - Résultats d'ACV relatifs à l'émission de GES des scénarios de production d'éthanol à partir de betterave.....	128
Tableau III.20 - Besoins énergétiques et résultats d'ACV du scénario de référence de production d'éthanol à partir de blé.....	129
Tableau III.21 - Besoins énergétiques et résultats d'ACV corrigés du scénario de référence de production d'éthanol à partir de blé.....	129
Tableau III.22 - Définition des variantes technologiques d'étude du procédé de production d'éthanol à partir de blé.....	130
Tableau III.23 - Définition des variantes de valorisation des co-produits du procédé de production d'éthanol à partir de blé.....	130
Tableau III.24 - Résultats d'ACV relatifs à la consommation énergétique des scénarios de production d'éthanol à partir de blé.....	131
Tableau III.25 - Résultats d'ACV relatifs à l'émission de GES des scénarios de production d'éthanol à partir de blé.....	131
Tableau III.26 - Besoins énergétiques simulés du scénario de référence de production d'éthanol à partir de canne à sucre.....	131
Tableau III.27 - Impacts évités liés à la valorisation du tourteau de colza.....	132
Tableau III.28 - Impacts évités liés à la valorisation de la glycérine.....	133
Tableau III.29 - Définition des variantes de valorisation des co-produits du procédé de production d'EMHV à partir de colza.....	133
Tableau III.30 - Résultats d'ACV des scénarios de production d'EMHV à partir de colza.....	133
Tableau III.31 - Coûts d'investissement des procédés de référence étudiés, exprimés par capacité de production installée.....	138
Tableau III.32 - Coût de référence des matières premières non végétales.....	138

Tableau III.33 - Coût de référence équivalent des engrais par élément fertilisant.....139
Tableau III.34 - Facteurs Fbaril utilisés des produits considérés.....140

Le chapitre II précédent a montré que la phase de transformation de la biomasse en carburants liquides est une phase essentielle de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) des carburants végétaux de première génération, surtout en ce qui concerne la consommation d'énergie des filières d'éthanol. Cependant les données accessibles au sein des études existantes ne se sont pas avérées suffisantes pour identifier correctement les déterminants de l'impact de cette phase.

L'objectif de ce troisième chapitre est donc d'étudier plus précisément les procédés de production de ces carburants et d'en identifier les principales voies d'amélioration. La section I présentera la méthodologie appliquée pour atteindre ces objectifs. Les sections II et III décriront ensuite respectivement les connaissances disponibles sur les procédés actuels et les bases nécessaires à l'étude de leurs différentes étapes unitaires.

Ceci permettra de réaliser une simulation des procédés et d'identifier et étudier le potentiel, en termes d'amélioration des bilans d'ACV, de nouveaux schémas de production. Les résultats de cette analyse seront exposés à la section IV. Enfin la section V, en s'attachant à déterminer les coûts de production des carburants végétaux, visera à identifier les éléments de contexte favorables à l'émergence des variantes de procédés précédemment définies.

I. Méthodologie d'analyse

I.1. Approche appliquée

L'approche employée ici pour déterminer les voies d'amélioration des procédés est résumée schématiquement à la figure III.2, page suivante. La méthodologie se décompose en quatre phases : une analyse bibliographique identifiant la structure des procédés à étudier ainsi que les connaissances théoriques à mobiliser, une simulation des procédés de référence et des variantes d'intérêt, un bilan d'ACV limitée à la phase de transformation de la biomasse en carburants liquides, et enfin l'analyse des résultats et les conclusions.

L'ensemble de l'approche a été appliquée aux procédés de production d'éthanol alors que la phase de simulation a été exclue pour l'étude de la production d'EMHV. En effet l'intérêt de ce travail de simulation tient à son exploitation par intégration thermique. Or si le besoin en énergie thermique de la transformation de la biomasse en éthanol est un facteur clef des procédés mais également des filières dans leur ensemble (voir chapitre II, section II.4), c'est moins le cas des procédés EMHV pour lesquels ce besoin représente de l'ordre de 50 à 60 % des besoins énergétiques du procédé (voir figure III.1), phase du cycle de vie elle-même moins prépondérante que dans le cas de l'éthanol.

Rappel : la section II.4 du chapitre II a montré que la transformation de la biomasse est une phase clef des consommations énergétiques des filières d'éthanol, représentant 73 et 91 % des résultats avant affectation pour, respectivement, le blé et la betterave. A l'inverse cette grandeur n'atteint que 43 % pour l'EMHV à partir de colza.

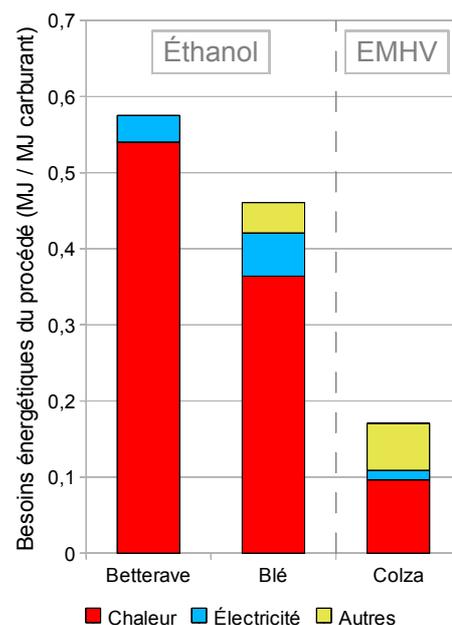


Figure III.1 - Répartition des besoins énergétiques des procédés de transformation de la betterave, du blé et du colza, selon l'étude JRC '15 [42]

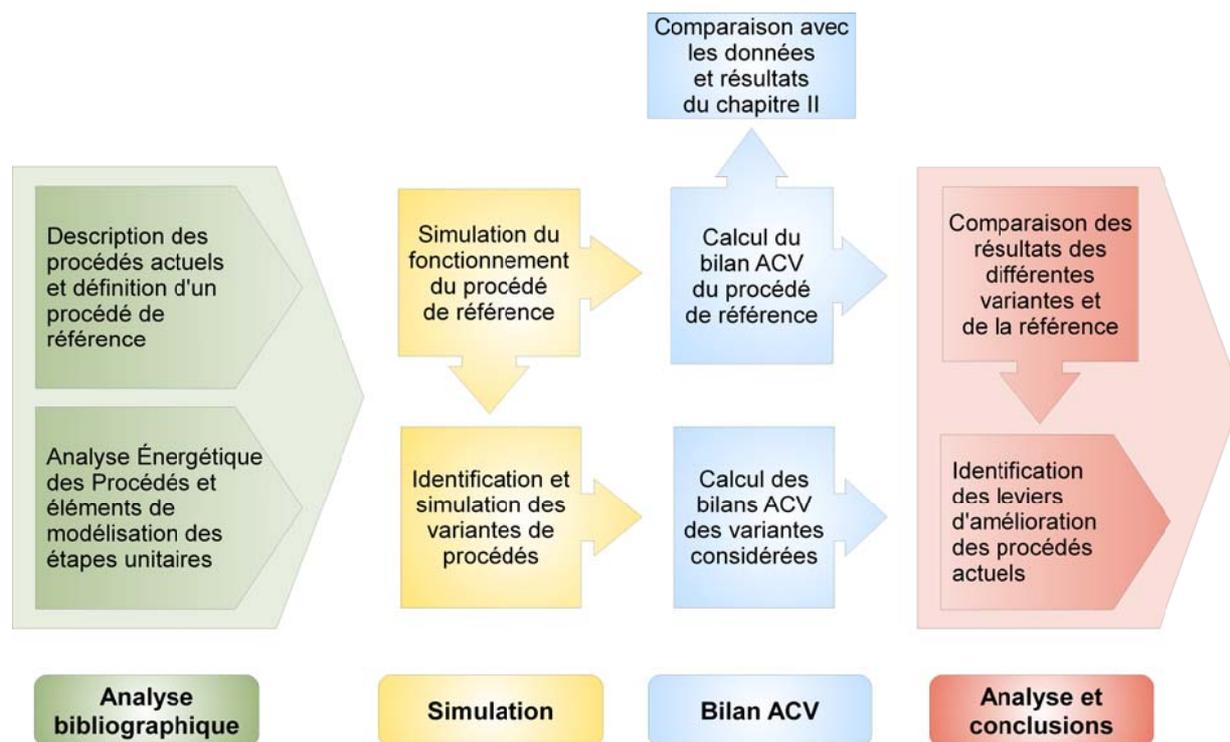


Figure III.2 - Schématisation de la méthodologie d'analyse des procédés du présent chapitre

Le premier objectif de l'analyse bibliographique est de décrire le principe de fonctionnement des procédés de transformation de la biomasse en carburants liquides de première génération, et d'identifier les technologies actuelles. Ainsi un procédé de référence est défini pour chaque filière (voir sections II.1 et II.2) et servira par la suite de base de comparaison pour les résultats d'ACV obtenus. Les éléments théoriques et les hypothèses nécessaires à la simulation des procédés à partir de leur description sont donnés à la section III.

A partir de ces connaissances, la simulation des procédés permet d'obtenir l'ensemble des flux de matière et d'énergie mis en jeu au sein des procédés étudiés. Puis, notamment selon la répartition des besoins en chaleur et des niveaux de température, les étapes unitaires essentielles sont identifiées et les variantes technologiques d'intérêt leur sont appliquées. La méthode d'Analyse Énergétique des Procédés (voir section I.2) traduit ensuite les résultats de chaque cas de simulation en besoins énergétiques globaux du site de transformation.

Remarque : compte tenu des hypothèses prises et du cadre général dans lequel cette étude s'est placée, les résultats de simulation obtenus n'ont pas la pertinence qui serait nécessaire à l'établissement d'un état des lieux précis des filières actuelles de carburants végétaux, ou à la conduite de procédés. Toutefois ces résultats sont suffisants pour distinguer des tendances et identifier les voies d'amélioration envisageables des filières de première génération.

A partir de la quantification des besoins énergétiques du site, ainsi que des quantités obtenues de co-produits, une ACV est réalisée pour chaque variante étudiée afin de définir l'impact, en termes de consommations d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre, des systèmes comparés. Pour chaque variante, les frontières du système comprennent le site de transformation de la biomasse et les filières de substitution des co-produits, décrites à la section II.3. La règle d'affectation employée est donc celle des impacts évités. L'indicateur de consommation d'énergie est relatif à l'énergie primaire, et celui d'émissions de gaz à effet de serre considère les trois gaz à effet de serre CO₂, CH₄ et N₂O, sur la base des Pouvoirs de Réchauffement Global définis par le quatrième rapport de l'IPCC pour un horizon de 100 ans, soit respectivement 1, 25 et 298 [110].

Les résultats d'ACV obtenus, bien que ne prenant pas en compte l'ensemble du cycle de vie des carburants végétaux mais uniquement leur phase de transformation, sont bien comparables puisque pour chaque filière, toutes les variantes mobilisent la même ressource en biomasse et produisent la même quantité de carburant, et que les éléments de contexte, variables selon les scénarios, que

constituent les différents usages des co-produits sont intégrés au sein des frontières étudiées. La comparaison de ces bilans d'ACV permet alors d'identifier les leviers d'amélioration des filières de première génération les plus pertinents, du point de vue de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre.

Toutefois, puisque l'impact énergie / gaz à effet de serre d'un produit n'est pas le seul critère intervenant dans un choix de procédé, les composantes des coûts de production des carburants végétaux seront abordées à la section V. En étudiant notamment les liens existants entre ces coûts et les éléments de contexte tels que le prix du baril et le cours des matières premières végétales, les conditions favorables au développement de certains schémas de production peuvent être identifiées.

I.2. Analyse Énergétique des Procédés

Les éléments d'Analyse Énergétique des Procédés présentés et utilisés ici s'appuient sur la *méthode du pincement*, issue des travaux de Linnhoff à la fin des années 70 [111, 112]. Son objectif premier est de réaliser l'intégration thermique d'un procédé et d'en identifier le réseau optimal d'échangeurs de chaleur. La première étape de la méthode est donc de lister l'ensemble des flux de chaleur du procédé étudié.

Le tableau III.1 présente un exemple d'une telle liste, extrait du cas de référence de la production d'éthanol à partir de betterave en période d'inter-campagne (voir section II.1.b). Trois types d'informations sont reportés dans le tableau III.1 : les températures initiales et finales, la quantité de chaleur mise en jeu et le caractère chaud ou froid des flux. Un flux froid désigne un besoin en chaleur tandis qu'un flux chaud traduit une disponibilité. Pour le présent travail l'enthalpie des flux est supposée évoluer linéairement en fonction de la température, ce qui n'est pas exact dans le cas des gaz réels (voir section III.1).

Tableau III.1 - Extrait de liste des flux de chaleur de procédé, cas de référence de la production d'éthanol à partir de betterave en inter-campagne

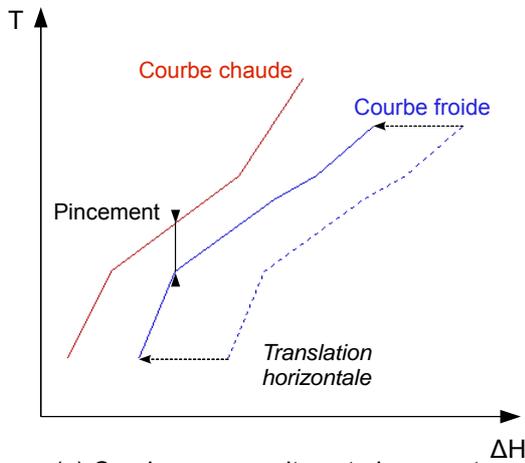
Flux	Température initiale (°C)	Température finale (°C)	Variation d'enthalpie (kJ / MJ EtOH)	
			Flux froids	Flux chauds
1 Sirop	12	35	7	
2 Eau de dilution	12	35	31	
3 Fermentation	35	35		33
4 Recycle flegmasse (vapeur)	135	85		1
...				

A partir de données telles que celles du tableau III.1 peuvent être construites les *courbes composites* du système. L'ensemble des flux chauds et froids sont respectivement agrégés en deux courbes dans un diagramme température-enthalpie (voir figure III.3, page suivante). L'abscisse du diagramme étant une variation d'enthalpie, ces deux courbes peuvent être translatées horizontalement de façon indépendante (voir figure III.3a). Puisque l'objectif du diagramme est d'identifier les échanges de chaleur possibles entre les flux chauds à refroidir et les flux froids à réchauffer, les deux courbes sont disposées de sorte que la courbe des flux froids, ou courbe composite froide, se situe au-dessous de la courbe des flux chauds, ou courbe composite chaude ; ceci traduit le fait qu'un échange de chaleur entre deux flux n'est possible que si la température du flux cédant de la chaleur est supérieure à celle du flux la recevant.

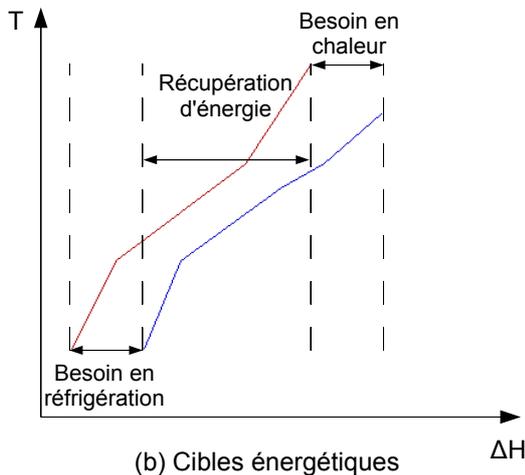
Remarque : l'extrait de données du tableau III.1 et les courbes des figures III.3 et III.4 ne sont pas liés.

Graphiquement, la gamme d'enthalpies pour laquelle la courbe chaude recouvre la courbe froide représente l'énergie qui peut être valorisée par un échange entre les deux types de flux (voir figure III.3b). Il est donc intéressant de maximiser cette quantité d'énergie et donc de décaler la courbe froide le plus possible vers la gauche. La limite théorique de ce décalage est la position pour laquelle apparaît un contact entre les deux courbes, qui supposerait un échange parfait entre les

deux flux ou une surface d'échange infinie. En pratique cependant un écart de température doit être assuré afin que le bon fonctionnement de l'échangeur de chaleur soit assuré. Cet écart de température est appelé le *pincement* (voir figure III.3a).



(a) Courbes composites et pincement



(b) Cibles énergétiques

Figure III.3 - Exploitation des courbes composites

Pour une valeur de pincement donnée, la figure III.3b permet de lire la quantité d'énergie qui peut être récupérée par échangeurs entre les flux chauds et froids, ainsi que les besoins résiduels en chaleur et en réfrigération du procédé. Ces besoins, appelés également *cibles énergétiques*, représentent une quantité d'énergie qui ne peut pas être valorisée de façon interne au procédé et doit donc être fournie par une utilité extérieure. La dénomination de cibles énergétiques rappelle que ces besoins identifiés correspondent à un réseau optimal d'échangeurs de chaleur, qui ne pourra pas toujours être mis en œuvre d'un point de vue pratique sur l'installation industrielle.

D'après la figure III.3, plus le pincement est faible, plus la chaleur valorisée au sein du procédé est importante et donc plus les cibles énergétiques sont réduites, ce qui diminue les frais de fonctionnement de l'installation industrielle. Cependant plus le pincement est faible, plus l'échange de chaleur est difficile à réaliser, ce qui implique une plus grande surface d'échange nécessaire au sein des échangeurs et donc augmente les frais d'investissement de l'installation. Le choix du pincement est ainsi le résultat d'une optimisation économique entre ces deux effets contradictoires. Le présent travail ne s'inscrivant toutefois pas dans le dimensionnement réel d'une installation industrielle, la valeur du pincement utilisée ici a été prise comme la valeur inférieure de la gamme de résultats disponibles dans la bibliographie pour ce type d'industrie, soit 10 °C pour une gamme de 10 à 20 °C [111, 112, 113].

Les courbes composites de la figure III.3 peuvent également être exploitées sous la forme d'une *courbe grande composite*, donnée en figure III.4. Pour obtenir celle-ci, chacune des courbes composites de la figure III.3 est translatée verticalement d'une valeur égale à la moitié de celle du pincement, vers le bas pour la courbe chaude et vers le haut pour la courbe froide. Pour chaque niveau de température la différence d'enthalpie entre les courbes chaude et froide ainsi décalées est reportée sur la grande courbe composite.

Cette construction permet de retrouver sur la grande courbe composite les valeurs des besoins en chaleur et en réfrigération du procédé (voir figure III.4). L'intérêt de cette représentation est notamment de pouvoir construire la fourniture d'énergie par des utilités multiples, permettant de remplir les besoins à différents niveaux de température.

Exemple : le besoin en réfrigération représente la chaleur excédentaire cumulée à partir de la température de pincement du procédé. Les courbes composites de la figure III.3 pourraient ainsi montrer que la totalité du

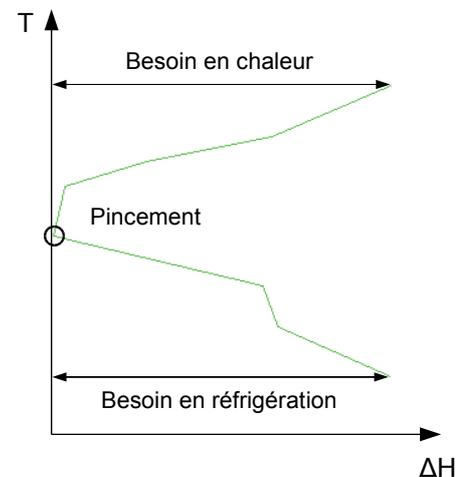


Figure III.4 - Grande courbe composite

besoin peut être apporté par un système frigorifique à la température du procédé. Cependant si le site industriel le permet, il sera généralement plus intéressant de fractionner le besoin global par une première utilité fonctionnant à l'eau de réfrigération, prélevée du milieu environnant, et une seconde utilité constituée du système frigorifique permettant de remplir le besoin résiduel ne pouvant être assurée par l'eau de réfrigération.

Pour le présent travail le logiciel *Hint*²² a été utilisé pour obtenir les courbes composites et grandes composites ainsi que les cibles énergétiques des différents procédés à partir des résultats de simulations. Compte tenu des niveaux de température rencontrés au sein des procédés étudiés (voir section II), le besoin en réfrigération a été supposé assuré par de l'eau de réfrigération disponible sur site et négligé du calcul. Le besoin en énergie thermique des procédés étudiés a été pris comme égal à la cible énergétique de l'utilité chaude.

I.3. Variantes de procédés étudiées

Les variantes étudiées des procédés peuvent être distinguées selon deux catégories : celles portant sur les technologies utilisées, et celles relevant de la valorisation des co-produits.

a) Variantes technologiques

La description des procédés actuels, donnée à la section II, montre que l'emploi de certaines technologies aujourd'hui disponibles et plus économes en termes de consommation d'énergie reste limité. En effet, le recours à la compression mécanique des vapeurs notamment est peu répandu au sein des procédés étudiés alors qu'il peut potentiellement améliorer l'efficacité de nombreuses étapes unitaires dont les évaporations, distillations ou séchages par vapeur d'eau surchauffée [115].

L'objectif de la compression mécanique des vapeurs est d'élever la température de condensation d'une vapeur en augmentant la pression. Ainsi l'énergie latente de condensation peut être valorisée à une température supérieure de celle de la vapeur initiale.

Exemple : au sein d'un évaporateur, chaque kilogramme d'eau évaporé peut potentiellement, en se condensant, fournir l'énergie nécessaire à l'évaporation d'un autre kilogramme d'eau. En pratique cependant l'écart de température nécessaire au bon fonctionnement de l'évaporateur et l'éventuel retard à l'ébullition du produit à évaporer (voir section III.7) ne permet pas cette valorisation de l'énergie contenue dans la vapeur. Une compression mécanique de la vapeur extraite de l'évaporateur permet alors de franchir cet obstacle puisqu'en élevant sa pression, la température de condensation de la vapeur d'eau augmentera également.

Les éléments théoriques relatifs à la compression mécanique de vapeurs seront exposés à la section III.4.

Le séchage par vapeur d'eau surchauffée, présenté à la section III.8.b est également une piste intéressante d'un point de vue énergétique dans le sens où il permet de valoriser plus facilement la chaleur latente de l'eau évaporée, qui peut représenter un poste important de consommation pour les procédés, que dans le cas de l'air humide issu d'un séchage traditionnel par entraînement [116].

b) Valorisation des co-produits

Les co-produits des filières de carburants végétaux, en tant que biomasse, sont susceptibles d'être valorisés théoriquement selon l'ensemble des voies présentées à la section I.3 du chapitre II : biomatériaux, biomolécules, ou bioénergie sous forme solide, liquide ou gaz. En pratique, les applications dans le domaine des biomatériaux ne possèdent pas d'exemples de valorisations dans ce cas.

A l'inverse, la valorisation énergétique des co-produits est envisageable sous toutes ses formes :

- bien qu'aujourd'hui inexistante à l'échelle industrielle, la production de carburants liquides à partir des co-produits pourrait être mise en place lorsque les technologies seront matures et constituerait une hybridation des procédés entre la première et la deuxième générations (voir chapitre II, sections I.3 et I.4),

²² *Hint* est un logiciel éducatif non-commercial développé par l'Université de Valladolid, Espagne [114]. La version actuelle au moment de ces travaux et donc utilisée ici est la 2.2.

- lorsque l'humidité des co-produits le permet, ceux-ci peuvent être valorisés en tant que combustibles solides, comme cela est déjà le cas pour la bagasse issue de la production d'éthanol à partir de canne à sucre (voir section II.1.c), ou pour les régimes de fruits vides issus de l'extraction de l'huile de palme [97] ; la combustion peut également être envisagée après un séchage des co-produits, toutefois son intérêt doit alors être étudié en comparant l'énergie récupérée à celle nécessaire au séchage,
- certains co-produits, tels que les vinasses de distillation de l'éthanol, se présentent sous la forme d'effluents relativement pauvres en matières sèches ; la valorisation sous forme humide de ces co-produits, par méthanisation, apparaît alors comme une voie de valorisation énergétique potentiellement intéressante et est d'ores et déjà étudiée et testée sur certaines installations [8, 117].

Enfin, l'application dans le domaine des biomolécules, au sens large, c'est-à-dire lorsque les co-produits sont valorisés pour certains composants d'intérêt, est aujourd'hui la plus répandue. Le type de valorisation en lui-même est très variable et dépend du constituant ciblé :

- des éléments minéraux, dont notamment l'azote N, le phosphore P et le potassium K : la récolte de la matière première agricole constitue une exportation de matières minérales pour les terres cultivées ; le retour des co-produits riches en ces éléments au sol représente donc une valorisation intéressante aujourd'hui largement répandue [117, 118],
- des éléments d'intérêt nutritionnel tels que les protéines ou les matières grasses : selon la qualité de la matière agricole initiale et les dégradations et traitements subis au cours du procédé, certains co-produits peuvent présenter des caractéristiques propices à une valorisation en alimentation animale [119], ou
- des composés chimiques particuliers à haute valeur ajoutée : certains co-produits contiennent, à des puretés plus ou moins grandes, des composés chimiques d'intérêt qui peuvent alors être intéressants à valoriser ; l'exemple sans doute le plus significatif d'une telle valorisation est la substitution, par la glycérine issue de la trans-estérification des huiles végétales par le méthanol lors de la production d'EMHV, de la glycérine synthétique utilisée notamment en cosmétique et pour la synthèse d'additif alimentaire [8].

D'après ces éléments et les pratiques actuelles (voir section II suivante), les variantes de valorisation des co-produits considérées ici sont les utilisations en tant qu'amendements agricoles, aliments pour bétail, substituts pour la chimie, combustibles solides et substrats de méthanisation. La section II.3 présentera les éléments techniques nécessaires à l'étude de ces différentes valorisations. Les éléments économiques, essentiels au choix de la valorisation, seront abordés à la section V.

II. Description des procédés

II.1. Filières de production d'éthanol

Comme vu à section I.4 du chapitre II, le principe de base des procédés de production d'éthanol de première génération est d'accéder aux sucres disponibles au sein des plantes afin de servir de substrat de fermentation à des levures, qui produiront alors cet alcool. Ces sucres peuvent être directement disponibles au sein de la plante, comme le saccharose de la betterave ou de la canne à sucre, ou stockés sous forme de polymères de glucose, comme l'amidon des céréales telles que le blé ou le maïs.

a) Étapes communes de production d'éthanol

La fermentation est généralement assurée par des levures du genre des *Saccharomyces* [8, 120], qui vont permettre la décomposition des sucres en éthanol C_2H_5OH d'une part et en dioxyde de carbone CO_2 d'autre part (voir section III.5). Leur température optimale de production est de l'ordre de 30 à 35 °C [8]. En outre la fermentation, en tant que pendant anaérobie de la respiration, s'accompagne d'un dégagement d'énergie, qui nécessite alors la mise en place d'un système de refroidissement afin de maintenir la température dans les cuves de fermentation.

L'éthanol est un inhibiteur de l'activité des levures. Par conséquent, le Titre Alcoométrique Volumique²³, ou TAV, du vin en sortie des fermenteurs dépasse rarement 10 à 12 % [8]. Or l'utilisation de l'éthanol pour la combustion nécessite que celui-ci soit anhydre, c'est-à-dire présentant un TAV d'au moins 99,8 %, afin d'éviter des problèmes de démixtion ultérieurs, lors du mélange de l'éthanol avec une base essence [8, 120]. Par conséquent, après un recyclage des levures, permis par une centrifugation ou une filtration du vin [8], l'alcool doit être séparé.

La difficulté du mélange eau / éthanol est que celui-ci forme un azéotrope à un pourcentage molaire en éthanol de 89,43 % à pression atmosphérique [115], soit un TAV de 96,47 %. L'obtention de l'éthanol anhydre à partir du vin de fermentation doit donc se faire en deux étapes. La première est une distillation classique, permettant de produire un flegme présentant un TAV de plus de 90 %, généralement de l'ordre de 93 % [8]. Pour le présent travail la technologie de référence est une distillation double effet, avec une colonne à pression atmosphérique et l'autre en dépression [8, 120].

Le résidu de la distillation, appelé *vinasse*, est un effluent liquide constitué majoritairement de l'eau séparée de l'alcool mais également d'une part non négligeable de matières sèches dont notamment les matières organiques non fermentescibles issues de la matière végétale initiale. Selon le contexte, cette vinasse sera généralement recyclée au sein du procédé ou traitée afin de constituer un co-produit intéressant du système.

La seconde étape de déshydratation de l'éthanol doit permettre de purifier celui-ci au-delà de l'azéotrope. Très souvent cette déshydratation se fait par une distillation azéotropique [115, 8, 120]. Le principe de cette technique est d'introduire un troisième composé, très généralement le cyclohexane, qui modifie l'azéotrope eau / éthanol. Ceci permet d'obtenir l'éthanol anhydre mais nécessite une séparation ultérieure et un recyclage du composé supplémentaire.

Toutefois la technologie de référence considérée dans le présent travail est la déshydratation sur tamis moléculaires, méthode plus récente et généralement choisie pour les nouvelles installations [115, 8, 120]. Dans ce cas le flegme issu de la distillation, extrait sous forme vapeur, est surchauffé, généralement à une température de 135 °C, puis envoyé sur les tamis, composés de zéolithes sur lesquelles s'adsorbent les molécules d'eau [115].

Afin d'assurer un fonctionnement en continu, le système est constitué de deux tamis en parallèle, ce qui permet que l'un assure la déshydratation tandis que l'autre est régénéré, selon des

23 Le TAV d'un mélange eau / alcool est défini comme le pourcentage volumique d'alcool dans le mélange à une température de référence de 20 °C.

cycles de l'ordre de 7 à 8 minutes. Un prélèvement en phase gazeuse, de l'ordre de 20 %, de l'éthanol déshydraté produit est injecté dans le tamis en régénération, mis sous une pression de 0,14 bar, ce qui permet de réaliser la désorption des molécules d'eau. La vapeur ainsi produite, riche en éthanol, est recyclée en distillation [115].

b) *Éthanol ex betterave*

La betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.) est une plante bisannuelle, c'est-à-dire que l'ensemble de son cycle de croissance s'accomplit en deux ans : une première année végétative de croissance et de développement des réserves racinaires, et une seconde reproductive de montaison et de floraison [121]. Son exploitation par l'industrie sucrière remonte au début du XIX^e siècle, promue par Napoléon Bonaparte pour combler l'insuffisance en sucre de canne due aux blocus maritime et continental qui opposent français et anglais [122]. La récolte a lieu dès la fin de la première année du cycle, avant que le sucre stocké ne soit consommé par la plante.

La betterave sucrière est généralement semée aux mois de mars-avril, et la racine récoltée de la fin du mois de septembre à la fin du mois de novembre [121]. Les feuilles et collets, comptant approximativement pour 50 % de la masse de racines, soit une production de l'ordre de 3 à 4 t / ha, et présentant une teneur en matière sèche de moins de 20 %, sont généralement laissés au champ voire utilisés, directement ou après ensilage, en alimentation animale [121, 123].

La composition moyenne de la racine de betterave, utilisée dans le présent travail, est donnée dans le tableau III.2 [42, 8, 120, 43]. Compte tenu de sa forte teneur en eau, propice à un développement de micro-organismes, la betterave ne peut être conservée durablement en tant que telle. Ceci induit un fonctionnement particulier des sucreries et sites de production d'éthanol à partir de betterave, en deux phases : la campagne, coïncidant avec la récolte et d'une durée prise ici de 90 jours [42, 117], et l'inter-campagne pendant le reste de l'année. Au cours de la campagne, tout le sucre des betteraves est extrait en un jus, dont une partie est utilisée pour la production de sucre ou d'éthanol, et dont l'autre partie est concentrée en un sirop qui est stocké. Durant l'inter-campagne ce sirop constitue la matière première du site.

Tableau III.2 - Composition moyenne de la racine de betterave

Constituant	Teneur massique
Eau	75 %
Saccharose	15 %
Non-sucre	10 %

Dans le cadre du présent travail, aucune production de sucre n'a été considérée, et la simulation effectuée du procédé se limite donc aux étapes directement liées à l'éthanol. Bien que déjà pris en compte dans d'autres études [42, 43, 84], ceci ne correspond pas à la pratique actuelle et entraîne plusieurs différences [83, 124] :

- modification du schéma thermique et par conséquent moindre intégration possible entre les flux,
- pas de production d'égout pauvre de deuxième jet, ou EP2, issu de la cristallisation du sucre et utilisé comme substrat de fermentation pour la production d'éthanol, et
- pas de gestion de la co-production sucre / éthanol.

Contrairement aux approches existantes [83, 124, 105, 82] il est important de préciser que, du point de la méthodologie de l'ACV, ce dernier élément ne nécessite pas de mettre en œuvre une méthode de résolution d'un problème d'affectation. En effet, la co-production sucre / éthanol constitue un cas de procédé combiné, c'est-à-dire que le ratio entre leurs volumes de production est fixé en fonction du contexte et non de contraintes physiques ou chimiques telle qu'une stœchiométrie de réaction. En accord avec les éléments présentés au chapitre I (voir section III.2.a du chapitre I et annexe B), cette multi-fonctionnalité peut être prise en compte par une évaluation de l'évolution des impacts globaux du procédé due à une modification marginale autour d'un point de fonctionnement donné. Le présent travail et donc la description suivante se placent dans un cas extrême de point de fonctionnement, sans production de sucre.

Pendant la campagne, les betteraves qui arrivent sur le site de production sont tout d'abord lavées et découpées en *cossettes*. Les eaux de lavage, dans lesquelles de la matière organique s'est dissoute pendant le lavage, peuvent présenter des Demandes Chimiques en Oxygène²⁴, ou DCO, de l'ordre de quelques grammes par litre après décantation. Elles sont généralement envoyées en lagunage, voire valorisées par méthanisation [117, 125].

Le sucre contenu dans les cossettes de betterave est extrait par diffusion. La température de cette étape, qui doit permettre un compromis entre une bonne diffusion du sucre et une extraction limitée d'impuretés, est généralement de 72 à 74 °C. Les cossettes épuisées, appelées pulpes, humides à plus de 90 %, sont ensuite pressées, pour atteindre une teneur en matières sèches MS de l'ordre de 25 %. Si ces pulpes pressées peuvent être utilisées en alimentation animale directement ou après ensilage, elles peuvent également être séchées, jusqu'à une teneur en MS de l'ordre de 90 %, afin de garantir leur bonne conservation [8, 125, 126]. Pour le présent travail il a été considéré que la totalité des pulpes est séchée, à l'aide d'un sécheur à vapeur d'eau surchauffée. Son utilisation est couplée à l'atelier d'évaporation du sirop (voir plus loin), la vapeur saturée extraite du sécheur étant valorisée au sein du premier effet de l'évaporation.

Comme indiqué précédemment, le jus de diffusion est ensuite divisé en deux flux distincts : tandis qu'une partie est utilisée pour la production d'éthanol (voir section II.1.a), l'autre est épurée puis concentrée afin d'être utilisée en inter-campagne, l'objectif étant d'assurer une production continue d'alcool tout au long de l'année. Les vinasses issues de la distillation du vin de fermentation sont recyclées en diffusion [117].

Le jus de diffusion nécessite d'être épuré avant de pouvoir être concentré. En effet il contient de nombreuses impuretés qui nuiraient à l'étape d'évaporation et dégraderaient la qualité du sirop. Cette épuration se fait principalement grâce à un traitement à la chaux : en hydratant de la chaux vive CaO par le jus de diffusion puis en faisant subir à celui-ci une carbonatation, cette chaux va précipiter et piéger les impuretés. Le calcaire CaCO₃, décomposé dans un four à chaux, permet de fournir les deux composés nécessaires à ce traitement, soit la chaux CaO et le dioxyde de carbone CO₂ pour la carbonatation, réalisée généralement en deux fois. Le précipité contenant la chaux et les impuretés peut être séparé du jus épuré par décantation ou filtration ; les boues alors obtenues constituent les *écumes*, qui sont séchées dans de grands bassins pour être vendues comme fertilisant en inter-campagne [125].

Le jus épuré est ensuite concentré pour atteindre une teneur en MS de l'ordre de 68 %. Cette étape d'évaporation se fait généralement en multiple effets [125] ; le scénario d'étude de référence prend en compte un évaporateur à cinq effets. Pendant l'inter-campagne, ce sirop, très concentré en sucre, nécessite d'être dilué afin que la concentration en éthanol du vin de fermentation soit compatible avec la tolérance des levures (voir section II.1.a). Les vinasses obtenues lors de la distillation de ce vin sont généralement concentrées jusqu'à une teneur en MS de 65 %, afin d'être vendues comme fertilisant [117, 127]. La technologie employée dans le scénario de référence pour cette concentration est une évaporation double effets combinée à une compression mécanique de vapeurs.

L'ensemble des étapes unitaires simulées du scénario de référence est donné aux figures III.5 et III.6 pour, respectivement, le fonctionnement en campagne et celui en inter-campagne.

24 La DCO d'un effluent est la quantité d'oxygène, en mg / L, nécessaire à l'oxydation des matières organiques de celui-ci.

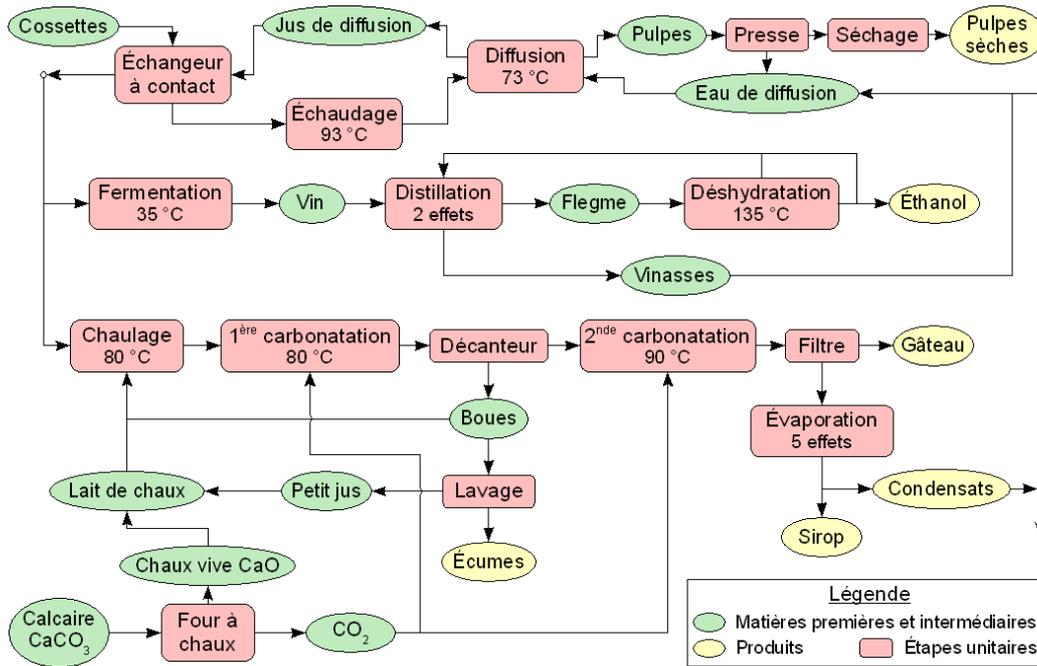


Figure III.5 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de betterave en période de campagne

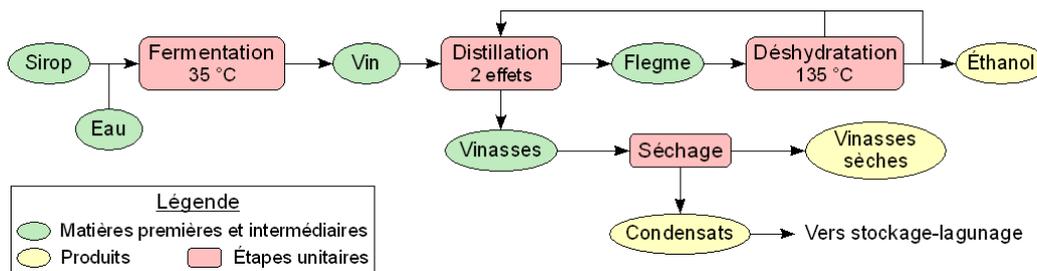


Figure III.6 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de betterave en période d'inter-campagne

c) *Éthanol ex canne à sucre*

La canne à sucre (*Saccharum officinarum* L.) est une plante pérenne cultivée en zones tropicale ou subtropicale, entre le 30° parallèle sud et le 37° parallèle nord [128], soit approximativement les latitudes extrêmes du continent africain. Avec 1590 Mt produits en 2007, c'est la première production végétale du monde, devant le maïs dont les tonnages sont environ deux fois moindres [129].

Les itinéraires culturels varient grandement selon les conditions locales, mais la récolte, ou *coupe*, a toujours lieu au cours de la saison sèche, pendant laquelle la richesse en sucre est plus importante. Ceci définit la période de campagne, celle d'inter-campagne correspondant à la saison des pluies. C'est au cours de cette dernière qu'ont généralement lieu les premières plantations. La canne est ensuite coupée environ tous les ans, pendant quatre à plus de dix ans, selon l'évolution des rendements, décroissant avec les années [128].

Tableau III.3 - Composition moyenne de la canne à sucre

Constituant	Teneur massique
Eau	70 %
Saccharose	14 %
Fibres	14 %
Non-sucre	2 %

La composition moyenne de la canne récoltée, utilisée dans le présent travail, est donnée dans le tableau III.3 [8, 128, 130, 131, 132]. La forte teneur en eau des tiges induit, de la même façon que pour la betterave, leur mauvaise conservation, et la biomasse récoltée est traitée en usine au maximum quelques jours après la coupe. Toutefois du fait de la plus longue durée de la période de campagne, coïncidant avec la saison sèche, et de l'adéquation

pendant celle-ci entre les coupes et l'approvisionnement de l'usine, cette dernière peut être arrêtée en inter-campagne, ce qui n'implique qu'un seul mode de fonctionnement [125, 128].

La production de sucre et d'éthanol à partir de canne à sucre peut se faire de façon couplée ou non : au Brésil, d'après les données du Ministère de l'Agriculture, 16 sites de production de sucre uniquement, 159 d'alcool et 248 mixtes ont été recensés au 4 août 2009 [133]. De la même façon que pour le procédé relatif à la betterave (voir section b précédente), seul le schéma de production exclusive d'éthanol est étudié ici.

Après avoir été lavée à l'eau à 30 °C, la canne est déchiquetée afin de faciliter l'extraction du sucre [125, 130]. Celle-ci est réalisée mécaniquement par des moulins à rouleaux, où la canne circule à 35 °C à contre-courant d'une eau d'extraction [130, 131]. Les résidus de canne épuisés, contenant principalement les fibres des tiges, constituent la bagasse, à environ 50 % de teneur en eau, qui sert de combustible sur le site [8, 130, 131, 132].

Afin de débarrasser le jus brut d'extraction de ses impuretés, celui-ci est traité par ajout de faibles quantités d'agents chimiques tels que la chaux CaO et l'acide phosphorique H₃PO₄ [125, 130, 131]. En portant le mélange à 105 °C, une précipitation a lieu et une filtration permet d'obtenir un gâteau à 70 % de MS, utilisé comme amendement, et un jus purifié [125, 130, 131, 132, 134].

Ce jus clair, après refroidissement, peut servir de base à la fermentation en éthanol (voir section II.1.a). La vinasse obtenue après distillation du vin présente de faibles teneurs en matières sèches et est alors généralement soit traitée comme un effluent, pour lequel il faudra alors notamment neutraliser sa DCO avant rejet, soit utilisée directement en irrigation des champs de canne [130, 131, 132].

L'ensemble des étapes unitaires simulées du scénario de référence est donné à la figure III.7. Il est à noter que l'efficacité énergétique des procédés existants de production d'éthanol à partir de canne à sucre peut s'avérer plus faible, de par les équipements ou les technologies employés, que celles relatives à l'exploitation de la betterave ou du blé [131]. Toutefois, afin de traiter les procédés de la même façon, cette éventuelle différence n'a pas été prise en compte et des technologies comme la déshydratation sur tamis moléculaires ont été conservées comme référence.

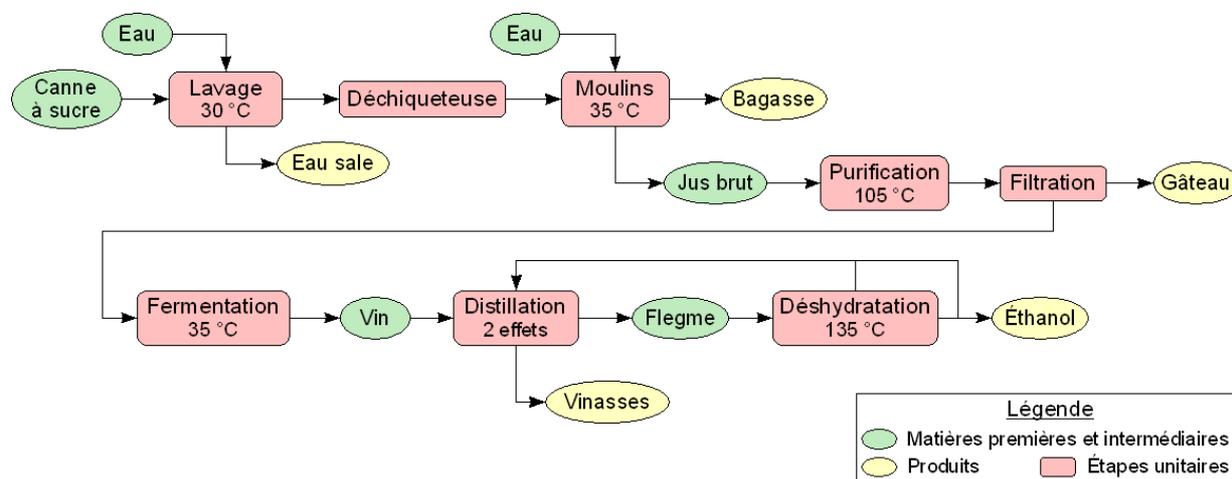


Figure III.7 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de canne à sucre

d) Éthanol ex blé

Le blé tendre (*Triticum aestivum* L. ssp. *aestivum*) est une plante annuelle implantée sur l'ensemble des continents. De façon générale, le blé est la plante présentant la plus grande surface cultivée dans le monde, devant deux autres céréales, le maïs et le riz [129]. Le blé tendre est apparu il y a plus 8000 ans par hybridation naturelle dans les champs cultivés par l'homme, et constitue aujourd'hui, avec le blé dur (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum*), l'une des deux espèces de blé principalement exploitées [122].

La durée du cycle végétatif dépend de la variété considérée : le blé tendre dit de printemps est semé à la fin de l'hiver, et le blé dit d'hiver, nécessitant environ huit semaines à des températures inférieures à 8 °C, est semé dès l'automne. Tous deux cependant sont récoltés à maturité du grain pendant l'été [122].

Le rendement en grains est très variable selon les régions : d'une moyenne mondiale comprise entre 2,7 et 2,9 t/ha de 2000 à 2007, il peut atteindre 9 voire 10 t/ha dans les bonnes régions [83, 129, 85]. La composition moyenne du grain utilisée pour le présent travail est donnée dans le tableau III.4 [42, 8, 135].

Tableau III.4 - Composition moyenne du grain de blé

Constituant	Teneur massique
Amidon	65 %
Eau	16 %
Autres	19 %

La production de grain s'accompagne de celle de paille, représentant environ 11 à 12 t/ha en France, dont environ la moitié, compte tenu de la hauteur de coupe nécessaire et des pertes, ne peut être récoltée [136]. La teneur massique en matière sèches de cette paille est, à la récolte, généralement assez élevée, de l'ordre de 85 à 88 % [136, 137]. Pour le présent travail il sera supposé que 6 t/ha de paille à 85 % MS peuvent être récoltées pour une production en grains de 9 t/ha. Toutefois le scénario de référence considèrera que cette paille est laissée au champ et enfouie.

La transformation des céréales en éthanol peut se faire selon deux types de procédés. Le premier, dit *wet milling*, cherche tout d'abord à extraire certains constituants du grain, tels que le contenu huileux, les fibres ou les protéines, en quantités variables selon la matière première et le contexte économique. L'amidon contenu dans le résidu est ensuite transformé en éthanol selon le même principe que le second type de procédé, dit *dry milling*, qui vise plus spécifiquement à produire de l'éthanol. Compte tenu de l'essor de la production d'éthanol pour la carburant, ce dernier type de procédé est aujourd'hui principalement mis en place et sera donc étudié dans ce travail [8].

Selon celui-ci le blé est tout d'abord réduit mécaniquement en une mouture, généralement par des broyeurs à marteaux. Puis celle-ci est empâtée à 45 °C, à l'aide d'une partie recyclée des vinasses clarifiées de distillation obtenues plus loin dans le procédé [138].

Ce moût empâté est liquéfié à l'aide d'enzymes à une température généralement comprise entre 90 et 110 °C, ici prise à 100 °C, ce qui permet d'obtenir une suspension contenant entre 20 et 40 % MS, ici pris à 30 %. Un second type d'enzyme réalise ensuite, à 60 °C, l'hydrolyse, appelée couramment saccharification, de l'amidon en glucose [113, 8, 138, 139]. Le moût saccharifié obtenu peut alors être fermenté et l'éthanol résultant distillé et déshydraté selon les principes exposés à la section II.1.a.

Les vinasses issues de la distillation de l'éthanol sont traitées afin d'être vendues en alimentation animale sous forme de granulés. Pour cela la matière sèche est tout d'abord séparée mécaniquement par centrifugation. Il est estimé ici que 40 % de la masse de matières sèches sont concentrés en drêches humides, atteignant une teneur en MS de 30 % [138]. Après cette séparation les vinasses clarifiées sont pour une part, prise ici de 40 % [138], recyclées en empâtage, et pour l'autre part envoyées en concentration multiple effets. Pour une meilleure efficacité du procédé, la vapeur issue de cette étape est valorisée au niveau de la distillation [113, 8].

Ces vinasses concentrées à une teneur en MS de 30 % sont alors, avec les drêches humides, séchées dans un sécheur fonctionnant au gaz naturel jusqu'à une teneur en MS de 92 % [113, 135, 138].

L'ensemble des étapes unitaires simulées du scénario de référence est donné à la figure III.8.

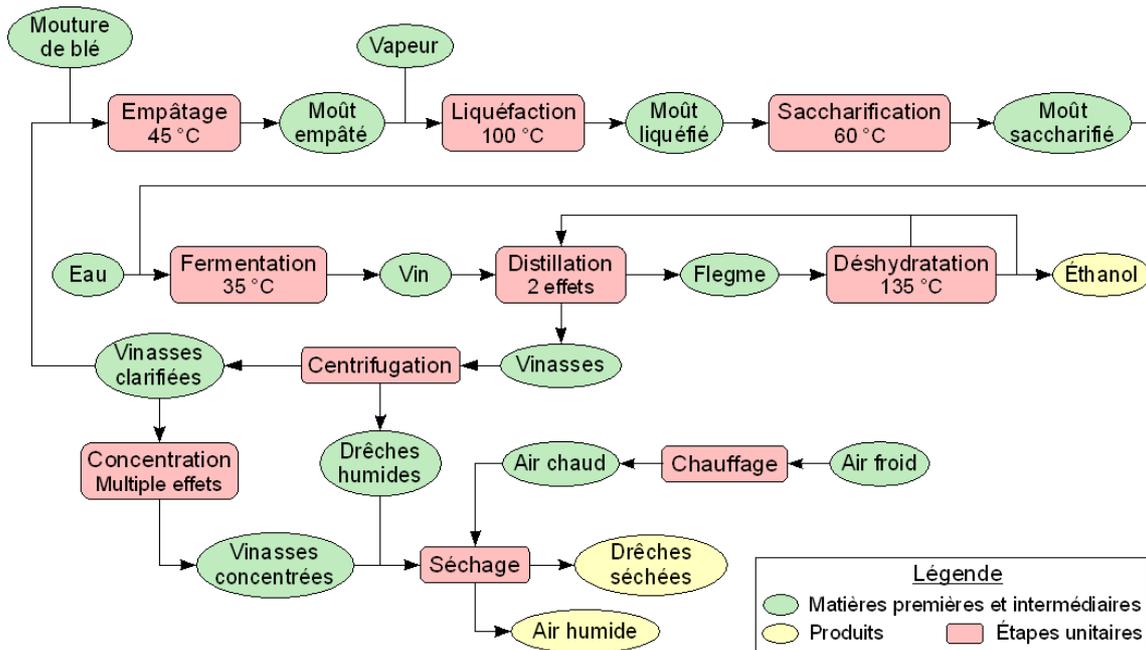


Figure III.8 - Fonctionnement schématique du procédé de référence de production d'éthanol à partir de blé

II.2. Filières de production d'EMHV

Les procédés de première génération d'exploitation des plantes oléagineuses consistent tout d'abord à en extraire les lipides afin d'obtenir une huile. Cette huile peut constituer, sous conditions de traitements plus ou moins poussés voire d'adaptations des moteurs, un carburant liquide pouvant se substituer au fioul ou au gazole [8, 140]. Le présent travail ne considérera cependant pas plus en détail ce type de filières mais la production d'EMHV.

La section a présente le processus d'obtention d'EMHV à partir de lipides. Les principes de cette description peuvent être généralisés à tous types d'huiles végétales, voire aux huiles alimentaires usagées ou aux graisses animales. La section b s'attachera plus particulièrement au procédé relatif au colza et à l'obtention d'une huile propre à être trans-estérifiée.

a) Trans-estérification des huiles végétales

Une huile végétale contient de nombreux types différents de lipides, dont la majorité appartient à la catégorie des acides gras, c'est-à-dire des chaînes carbonées contenant de 4 à 26 atomes de carbone, généralement en nombre pair, et présentant une fonction acide carboxylique $-COOH$ [141]. Les deux principales caractéristiques des acides gras sont leur longueur de chaîne et leur degré d'insaturation, correspondant dans ce cas au nombre de doubles liaisons de la chaîne carbonée ; l'acide est dit saturé si ce degré est nul, monoinsaturé s'il vaut 1 et polyinsaturé dans les autres cas.

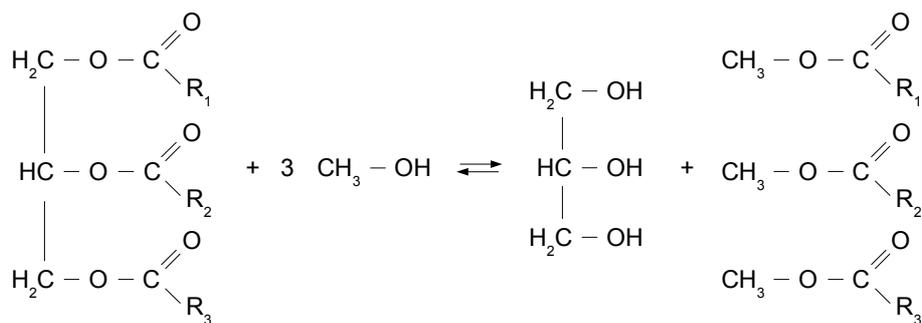
Notation symbolique : la notation la plus simple d'un acide gras rappelle la longueur de la chaîne carbonée et son degré d'insaturation. Ainsi, l'acide linoléique, acide gras présentant une chaîne à 18 atomes de carbones et un degré d'insaturation de 2, et principal constituant de l'huile de tournesol, est noté de façon symbolique C18:2 [8, 141].

Les notations symboliques plus complètes indiquent notamment la position des doubles liaisons.

La composition en acides gras des huiles végétales dépend de la plante considérée, et influe sur ses caractéristiques et son comportement en moteur. Ainsi, le point d'écoulement, déterminant pour la tenue à froid, et l'indice de cétane, lié au délai d'auto-inflammation du carburant, d'une huile végétale sont intimement liés à la longueur de ses chaînes et de leur degré d'insaturation [8, 141, 142]. Ces phénomènes expliquent notamment les difficultés en carburation rencontrés aux températures européennes avec l'huile de palme ou l'ester méthylique associé [8].

Les huiles végétales ne contiennent que très peu d'acides gras à l'état libre, au profit de formes estérifiées tels que les triglycérides, représentant généralement 95 à 98 % de la masse des huiles [8, 141]. Un *triglycéride* est un composé chimique issu d'un glycérol dont les trois fonctions alcool ont été estérifiées par des acides gras. Le glycérol est également appelé *glycérine*.

Le principe de la trans-estérification d'une huile végétale est de produire, à partir des esters que sont les triglycérides et d'un alcool, de nouveaux esters, selon la réaction globale représentée à la figure III.9 ; ceci a pour conséquence de diminuer fortement la viscosité de l'huile initiale [8, 142]. Dans le cas des EMHV, cet alcool est le méthanol, mais des techniques ayant recours à l'éthanol et donc produisant des Esters Éthyliques d'Huile Végétale (EEHV) sont en développement [8].



Triglycéride + 3 Méthanol \rightleftharpoons Glycérol + Esters méthyliques

Figure III.9 - Réaction de trans-estérification d'un triglycéride par le méthanol

La réaction générale donnée en figure III.9 se décompose en réalité en trois réactions intermédiaires de trans-estérification, au cours desquelles les triglycérides sont consécutivement transformés en diglycérides, monoglycérides et enfin glycérol. Chacune de ces réactions est réversible et cette étape de production d'EMHV se fait donc, au niveau industriel, en présence d'un excès de méthanol et d'un catalyseur. Si de nombreux types de catalyseurs peuvent être utilisés pour la trans-estérification des huiles végétales, les catalyseurs basiques tels que le méthanolate de sodium CH_3ONa , la soude NaOH , voire la potasse caustique KOH , sont aujourd'hui préférentiellement utilisés, pour les bons rendements en EMHV et vitesses de réaction obtenus et pour leur coût limité [8, 142, 143, 144].

La principale réaction pouvant concurrencer la trans-estérification est la saponification des acides gras, c'est-à-dire leur transformation en savons par hydrolyse en milieu basique. Afin de limiter cette réaction et la consommation de catalyseur, la présence d'eau et d'acides gras libres doit être limitée autant que possible pendant la trans-estérification, ce qui implique généralement un traitement préalable de l'huile (voir section b suivante pour le cas du colza) [8, 142]. En fonction du catalyseur retenu et de la pureté des réactifs, la trans-estérification est alors réalisée à une température pouvant varier de 45 à 85 °C, en présence du méthanol en quantité simple à double des conditions stœchiométriques et jusqu'à 1 %, en masse, de catalyseur [8, 142, 143, 144]. Le rendement massique en esters est alors généralement supérieur à 98,5 % [8].

En sortie des réacteurs de trans-estérification, la phase organique contient donc l'EMHV mais aussi du glycérol, du méthanol et du catalyseur. Afin d'être purifié et de respecter les spécifications, l'EMHV subit généralement un lavage à l'eau avant d'être séché à 140 °C à une pression de l'ordre de 0,04 à 0,06 bar. Le catalyseur contenu dans les eaux de lavage et la glycérine est neutralisé par un ajout d'acide, puis le mélange est distillé, ce qui permet notamment de recycler le méthanol et d'obtenir une glycérine pure à 80 à 90 % [8].

b) EMHV ex colza

Le colza (*Brassica napus* L. var. *napus*) est une plante annuelle cultivée pour la teneur en huile de ses graines, vraisemblablement implantée en Europe depuis le XVe siècle. Concurrencée par d'autres oléagineux tels qu'aujourd'hui le soja ou le palmier à huile, ou il y a un siècle l'arachide ou

l'olivier, la production de colza a fluctué au cours de l'histoire en fonction notamment du contexte géopolitique [122]. En 2007 les plus grands producteurs de colza sont la Chine (10,4 Mt), le Canada (9,5 Mt), l'Inde (7,4 Mt), l'Allemagne (5,3 Mt) et la France (4,6 Mt) [129].

De la même façon que le blé tendre (voir section II.1.d), le colza possède deux types de variétés dont dépend la durée du cycle végétatif : en France, le colza d'hiver est semé de fin août à fin septembre et récolté en juillet, tandis que le colza de printemps, ne nécessitant pas de période de vernalisation mais plus sensible au froid, est généralement semé au mois de mars et récolté en août-septembre [145]. Les rendements obtenus sont très variables à l'échelle mondiale mais également entre grands producteurs : de 2000 à 2007, ceux-ci sont de l'ordre de 1 t / ha en Inde, compris entre 1,2 et 1,8 t / ha en Chine et au Canada, et atteignent 2,7 à 4,1 t / ha en France et en Allemagne [129].

La composition moyenne de la graine de colza, issue de mesures à la récolte en France pour les cinq années 2004-2008, est donnée dans le tableau III.5 [145]. L'objectif du procédé de production d'huile végétale de colza est d'isoler le contenu lipidique de ces graines afin de pouvoir l'estérifier par la suite (voir section a précédente) ; ceci se fait en trois étapes : la trituration, l'extraction et le raffinage.

Tableau III.5 - Composition des graines de colza à la récolte, moyenne française 2004-2008

Constituant	Teneur massique
Lipides	43 %
Protéines	19 %
Eau	8 %
Autres	30 %

La trituration vise à retirer mécaniquement un maximum d'huile des graines. Pour cela celles-ci sont cuites puis pressées, ce qui permet d'obtenir une huile brute et un tourteau gras, contenant encore de 12 à 15 % d'huile en masse. Afin de diminuer les pertes en huile, une extraction au n-hexane de l'huile résiduelle du tourteau est réalisée [8]. Le tourteau de colza, débarrassé des lipides de la graine, est relativement riche en protéines et est donc très généralement utilisé comme aliment animal, en substitution d'autres tourteaux comme ceux de soja [8, 42, 145].

L'huile brute obtenue après extraction contient un certain nombre d'impuretés et de composés qui pourront perturber ultérieurement l'étape de trans-estérification ; le raffinage a alors pour objectif d'améliorer la qualité de l'huile en éliminant notamment les phospholipides et les acides gras libres. L'élimination des phospholipides est basée sur leur caractéristique de précipiter en présence d'eau ; l'étape de démulcination vise à accélérer ce phénomène en ajoutant à l'huile de l'acide phosphorique, à une température comprise entre 70 et 80 °C [8].

Comme vu à la section a précédente, la présence d'acides gras libres dans l'huile diminue l'efficacité de la trans-estérification, notamment en consommant le catalyseur au cours d'une réaction de saponification. La neutralisation de l'huile va justement favoriser cette réaction en mélangeant à l'huile brute une solution de soude, à une température de 80 à 90 °C. Les savons alors formés présentent l'avantage de piéger certaines impuretés de l'huile [8].

Au terme de ces deux étapes de démulcination et de neutralisation, les précipités de phospholipides et les savons sont séparés de l'huile par centrifugation. Un lavage à l'eau complète cette élimination d'impuretés [8].

L'huile neutre obtenue est transformée en EMHV au cours de la trans-estérification, consommant essentiellement du méthanol et conduisant à la formation d'un autre co-produit du procédé : la glycérine (voir section a précédente). Celle-ci est aujourd'hui principalement valorisée en substitution de glycérine synthétisée à partir de propylène C₃H₆, issu de l'industrie pétrolière [8, 43]. Toutefois les niveaux envisagés de production d'EMHV en Europe sont suffisants pour saturer le marché mondial de glycérine dès 2010, et d'autres débouchés devront donc être mis en place [8, 99].

la figure III.10 représente de façon schématique le procédé global de production d'EMHV à partir de colza.

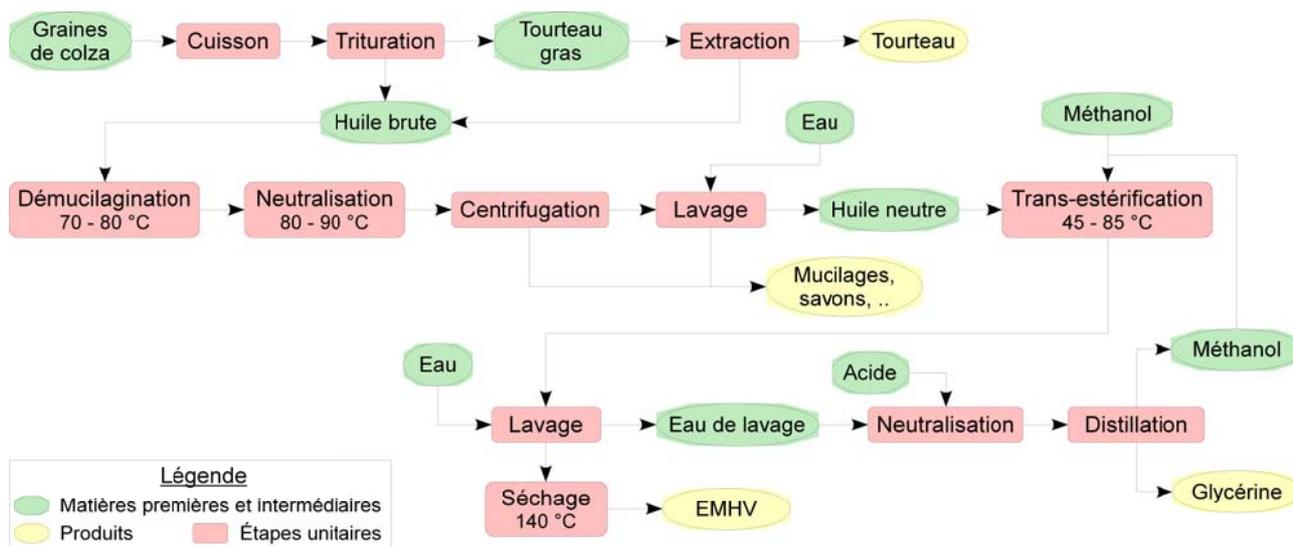


Figure III.10 - Fonctionnement schématique du procédé de production d'EMHV à partir de colza

II.3. Voies de valorisation des co-produits

a) Substitutions étudiées

Les sections II.1 et II.2 précédentes ont cité les co-produits des filières de carburants végétaux présentées et leurs voies courantes de valorisation. Certains d'entre eux ont été étudiés plus précisément dans le présent travail en en comparant différentes valorisations, selon les informations disponibles, les enjeux existants ou les quantités mises en jeu [42, 118, 43]. Le tableau III.6 présente la voie de référence et les variantes d'étude pour chacun des co-produits considérés.

Tableau III.6 - Co-produits étudiés et voies de valorisation associées

Filières		Co-produits	Voies de valorisation				
Carburant	Matière première		Amendement agricole	Alimentation animale	Chimie	Combustible	Méthanisation
EtOH	Betterave	Pulpes		✓ Réf.		✓	✓
		Vinasses	✓ Réf.			✓	✓
	Blé	Canne à sucre				✓ Réf.	
		Paille	✓ Réf.			✓	
		Drêches		✓ Réf.		✓	✓
EMHV	Colza	Tourteaux		✓ Réf.		✓	
		Glycérine		✓	✓ Réf.	✓	

Les sections b à f suivantes présentent, pour chacune des voies étudiées, les principes de la valorisation et de sa prise en compte dans les calculs d'ACV, ainsi que les données nécessaires relatives aux co-produits concernés.

b) Amendement agricole

Utiliser un co-produit comme amendement agricole permet de restituer au sol certains des éléments minéraux exportés lors de la récolte et ainsi éviter, ou du moins diminuer, le recours à des engrais de synthèse. Seul le caractère fertilisant de l'azote N, le phosphore P et le potassium K a ici été considéré. Les teneurs en matières minérales considérées pour le présent travail de la vinasse de betterave et de la paille de blé est donnée dans le tableau III.7 [137, 146].

Tableau III.7 - Teneurs en matières minérales des co-produits utilisés comme amendement agricole

Co-produits	Teneurs en matières minérales (en % de MS)		
	N_{-eq}	$P_2O_5_{-eq}$	K_2O_{-eq}
Vinasse de betterave	6,3	0,53	13,1
Paille de blé	3,5	0,18	0

L'épandage de vinasse et l'exportation de paille ont été supposés modifier l'apport d'engrais de synthèse d'une quantité exactement équivalente aux teneurs présentés dans le tableau III.7. Cet effet a été considéré dans les bilans d'ACV de consommations énergétiques et d'émissions de GES en supposant un impact des engrais de synthèse tel que donné dans le tableau III.8, issu des médianes des données collectées au chapitre II précédent. Les éventuelles modifications dans les opérations agricoles, notamment les passages de tracteurs, n'ont pas été pris en compte.

Tableau III.8 - Impact des engrais de synthèse

Élément minéral	Impact par kg d'élément minéral	
	Consommation énergétique (MJ)	Émissions de GES (kgCO _{2-éq})
N	47,8	6,35
P ₂ O ₅	15,5	1,12
K ₂ O	10,2	0,67

L'utilisation de ces co-produits comme amendement agricole permet également d'enrichir la terre en matières organiques (MO), lui permettant d'améliorer ou de maintenir sa stabilité et de favoriser son rôle de puits de carbone. Le chapitre IV suivant présentera les mécanismes de ce phénomène, qui modifie de nombreux éléments déterminants du bilan de GES d'une culture tels que le stock de carbone du sol, les processus de nitrification et dénitrification à l'origine des émissions de N₂O, ou encore les rendements atteints, et ce dans des proportions différentes selon la nature du sol et les conditions de culture.

L'impact associé au moindre apport de MO au sol sera donc considéré de façon globale pour la présente étude, sans distinction de conditions locales, à partir de la bibliographie disponible. Ainsi chaque récolte complète de paille sera supposé induire l'émission de 1 tCO_{2-éq} / ha, résultat moyen issu de simulations conduites pour des conditions rencontrées en Picardie [147], tandis que l'impact lié à l'apport de MO par l'épandage des vinasses de betterave sera négligé par manque d'éléments pertinents.

c) Alimentation animale

Selon leur contenu, certains co-produits peuvent s'avérer intéressants en alimentation animale. L'identification et la quantification du ou des produits auxquels ils vont se substituer est toutefois difficile à définir correctement tant celles-ci dépendent des caractéristiques nutritives du co-produit (valeurs alimentaires, digestibilité, appétence, etc), du contexte économique des filières d'aliments, et du contexte local du site de transformation.

Les données relatives à la prise en compte de ce type de valorisation sont regroupées dans le tableau III.11. Les règles d'équivalence tiennent compte des teneurs en protéines et des digestibilités des différents produits [42], et les valeurs d'impact du blé et du tourteau de soja sont issues des médianes des données collectées au chapitre II précédent.

Tableau III.9 - Données relatives à la prise en compte de la valorisation des co-produits en alimentation animale

Co-produit C considéré	Produit S substitué	Règle d'équivalence (kg S / kg C)	Impact du produit S, par kg	
			Consommations énergétiques (MJ)	Émissions de GES (gCO _{2-éq})
<i>Pulpes de betterave</i>	Blé	0,83	1,74	294
<i>Glycérine</i>		1,06		
<i>Drêches de blé</i>	Tourteau de soja	0,78	9,27	603
<i>Tourteau de colza</i>		0,80		

d) Substitution de substances chimiques synthétiques

Parmi les co-produits étudiés, seule la glycérine issue des filières d'EMHV possède une valorisation en tant que substitut de substance chimique de synthèse. Cette substance de référence peut être, selon les études, la glycérine synthétique (*SLU '02, Bio-Fit '10, GM '10*) ou le propylène glycol (*JRC '10, JRC '15*). Dans chacun des deux cas, la substitution est supposée se faire sur une base de 1 MJ pour 1 MJ.

Le crédit global dû à la substitution de la substance de synthèse par la glycérine issue des filières d'EMHV est évalué ici à partir de la médiane des valeurs considérées dans les différentes études et recueillies dans le cadre du chapitre II, soit 0,35 MJ et 15,6 gCO_{2-éq} par MJ d'EMHV.

e) Combustible solide

Tous les co-produits considérés dans le tableau III.6 peuvent potentiellement être utilisés, directement comme pour la bagasse, la paille de blé, le tourteau de colza et la glycérine, ou après séchage, comme pour les pulpes et vinasses de betterave, et les drêches de blé, en tant que combustible solide. Pour les co-produits nécessitant un séchage préalable, il a été supposé en première approximation que l'objectif de teneur en MS du séchage était le même que pour les autres valorisations sèches. Les pouvoirs calorifiques de ces différents types de biomasse sont donnés dans le tableau III.10 [42, 131, 136, 148].

Tableau III.10 - Pouvoir calorifique des co-produits

Co-produit	Pouvoir calorifique inférieur (MJ / kg MS)
Pulpes de betterave	15,6
Vinasses de betterave	15,6
Bagasse	17,3
Paille de blé	16,9
Drêches de blé	16,0
Tourteau de colza	15,5
Glycérine	16,0

L'énergie fournie par la combustion des co-produits est supposée se substituer à celle apportée par le gaz naturel, selon les rendements de chaudières présentés à la section III.2, au sein même du procédé ou sur des sites industriels à proximité. Le transport éventuel du combustible est supposé limité et son impact négligé.

f) Méthanisation

La méthanisation désigne un ensemble de réactions de dégradation de la matière organique en conditions anaérobies. Ce phénomène, assuré par une population de différents micro-organismes, se produit naturellement notamment dans la panse des ruminants ou les marais. Les deux principaux intérêts de son exploitation à un niveau industriel sont sa capacité à traiter les effluents riches en MO et sa production de gaz, constitué de méthane CH₄, à hauteur de 50 à 80 %, pris ici à 60 %, le reste étant essentiellement du dioxyde de carbone CO₂ [149, 68].

La gamme optimale de température de méthanisation dépend du type de bactéries considérées : de l'ordre de 15 à 25 °C pour des populations psychrophiles, de 25 à 45 °C pour des mésophiles et de 55 à 65 °C pour des thermophiles [149, 68, 150]. Pour la présente étude un milieu mésophile à 35 °C a été considéré.

Le potentiel de production en méthane des co-produits considérés a été déduit de données de la bibliographie [126, 127, 150, 151, 152, 153]. Les teneurs moyennes en MO et les potentiels de dégradation de cette MO utilisés pour la présente étude sont donnés dans le tableau III.9. Le pouvoir calorifique inférieur du méthane est pris à 50 MJ / kg [42].

Tableau III.11 - Données relatives à la prise en compte de la méthanisation des co-produits

Co-produit	Teneur en MO (% MS)	Production potentielle de gaz (L / kg MO, aux CNTP²⁵)
<i>Pulpes de betterave</i>	91	380
<i>Vinasses de betterave</i>	68	400
<i>Vinasses de blé</i>	97	440

25 CNTP : Conditions Normales de Température et de Pression, soit une température de 20 °C et une pression de 1 atm.

III. Données et bases théoriques de simulation des opérations unitaires et des calculs d'ACV

Les données et éléments théoriques exposés dans la présente section sont relatifs essentiellement aux traitements thermiques des flux des procédés décrits dans la section II.1. En l'absence d'éléments théoriques suffisamment précis, les besoins en énergie mécanique n'ont ainsi pas été pris en compte, à l'exception de la compression des vapeurs, présentée à la section III.4 ; ceci concerne donc notamment les étapes de broyage, découpage ou centrifugation. De plus, les nombreux produits chimiques utilisés au sein des procédés, souvent en quantités faibles selon les composés présents dans la matière végétale initiale, n'ont pas été tracés et sont donc absents des bilans d'ACV.

L'influence de ces hypothèses est évaluée au sein de la section IV en comparant les données globales issues de la bibliographie aux résultats obtenus par ces simulations.

III.1. Hypothèses générales et données des corps purs

L'ensemble des transformations considérées ici sont supposées réversibles. Les pertes de chaleur et de charge sont négligées. Les données utilisées pour caractériser les propriétés thermodynamiques constantes de l'eau et de l'éthanol sont reproduites dans le tableau III.12 [154, 115].

Tableau III.12 - Principales caractéristiques thermodynamiques de l'eau et de l'éthanol

		<i>Eau</i>	<i>Éthanol</i>
Masse molaire (g / mol)		18	46
Phase liquide	Densité à 20 °C (kg / L)	1,00	0,79
	Capacité calorifique (kJ / kg / °C)	4,20	2,43
	Pouvoir calorifique (MJ / kg)	-	26,8
Vaporisation à pression atmosphérique	Température (°C)	100	78,35
	Chaleur latente (MJ / kg)	2,26	0,84
Équation d'Antoine (Température en K et pression en bar)	A	5,08	5,25
	B	1663,13	1598,67
	C	- 45,62	- 46,42
Phase gaz	Gamma γ	1,33	1,18

Les grandeurs A, B et C du tableau III.12 sont relatives à l'équation d'Antoine, liant température de vaporisation T_{vap} et pression de vapeur saturante P_{sat} [154] :

$$\log (P_{sat}) = A - \frac{B}{T_{vap} + C} \quad (5)$$

Certains éléments de simulation ont nécessité de manipuler des variations d'enthalpie de vapeurs en fonction de la température et de la pression. Or, contrairement aux liquides, supposés ici incompressibles, la capacité calorifique des composés en phase gazeuse ne peut pas être considérée constante. Toutefois, pour chacune des transformations faisant intervenir une évolution de vapeur, sa variation d'enthalpie a été supposée évoluer de façon linéaire entre les deux états extrêmes. Une capacité calorifique à pression constante C_p moyenne a ainsi été définie pour chacune de ces

transformations, prise égale à la moyenne des capacités calorifiques des deux extrêmes, issues de la base de données du NIST²⁶ [154].

Les caractéristiques relatives à d'autres corps que l'eau et l'éthanol sont regroupées au sein du tableau III.13 [154, 42].

Tableau III.13 - Caractéristiques employées relatives aux corps autres que l'eau et l'éthanol

	CO_2	CH_4	<i>Glucose</i>	<i>Saccharose</i>
Masse molaire (g / mol)	44	16	180	342
Densité à 20 °C (kg / m ³)	1,84	0,67	-	-
Pouvoir calorifique (MJ / kg)	-	50	-	-

III.2. Hypothèses et données relatives aux calculs d'ACV

L'exploitation de la simulation des procédés présentés à la section II.1 permet de déterminer leurs besoins en chaleur et en électricité. Ces besoins peuvent être remplis soit par un système de cogénération, soit par l'utilisation d'une chaudière et de l'électricité du réseau. Les rendements considérés ici des chaudières au gaz et à biomasse sont respectivement de 90 et 85 % [42, 68]. L'utilisation d'un système à cogénération, d'un rendement de 35 % en électricité et 55 % en chaleur, a été prise en compte pour la production d'éthanol à partir de betterave, en période de campagne.

Les données liées à l'impact des différentes sources d'énergie utilisées sont présentées dans le tableau III.14. Celles-ci agrègent l'impact lié au combustible en lui-même mais également celui de sa production. Les valeurs correspondent à des impacts moyens pour l'Europe [42].

Tableau III.14 - Impacts d'ACV associés à l'utilisation des sources d'énergie

Source d'énergie	Impact associé, par MJ	
	Consommations énergétiques (MJ)	Émissions de GES (gCO _{2-éq})
<i>Charbon</i>	1,09	96,3
<i>Gaz naturel</i>	1,13	56,4
<i>Électricité</i> (mix européen)	2,83	128,2

III.3. Chauffage et refroidissement

La chaleur échangée \dot{Q} lors du chauffage ou du refroidissement d'un liquide, supposé incompressible, égale à sa différence d'enthalpie H, s'exprime à partir du débit du fluide \dot{m} , de sa capacité calorifique massique à pression constante C_p et de sa variation de température T selon l'expression de l'équation (6) [155] :

$$\Delta H = \dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6)$$

Les mélanges eau / éthanol liquides sont considérés comme homogènes et présentant une capacité calorifique massique égale à la moyenne, pondérée des masses, des capacités des deux corps pris à l'état pur. Pour les liquides composés d'eau et de matières organiques dissoutes, présentant une teneur massique en matières sèches x_{MS} , leur capacité calorifique C_p est calculé à partir de l'approximation de l'équation de Rahman, donnée en équation (7), considérant une capacité calorifique de la matière organique égale à un tiers de celle de l'eau [115].

$$C_{P, eau+MO} = (1 - x_{MS}) \cdot C_{P, eau} + x_{MS} \cdot \frac{C_{P, eau}}{3} = (1 - \frac{2}{3} x_{MS}) \cdot C_{P, eau} \quad (7)$$

26 NIST : National Institute of Standards and Technology.

Comme indiqué à la section III.1 précédente, l'équation (6) a également été appliquée aux gaz et vapeurs, en adaptant la valeur de la capacité calorifique C_p à chaque transformation [154].

III.4. Compression de vapeur

La vapeur d'eau est supposée se comporter comme un gaz parfait. La compression est supposée adiabatique réversible, soit isentropique. Les températures T_i et pressions P_i de la vapeur au cours d'une compression d'un état 1 vers un état 2 respectent donc l'équation (8), qui est l'une des relations de Poisson [156] :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (8)$$

où γ est le rapport entre les capacités calorifiques à pression et à volume constants $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Or pour un gaz parfait idéal, le travail isentropique \dot{W}_{IS} de compression peut s'exprimer selon l'équation (5) :

$$\dot{W}_{IS} = \Delta \dot{H} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (9)$$

Le travail de la compression s'exprime alors, à partir des équations (8) et (5), en fonction de l'état initial de la vapeur et de sa pression cible selon l'équation (10).

$$\dot{W}_{IS} = \dot{m} \cdot C_p \cdot T_1 \cdot \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (10)$$

Dans le cadre du présent travail, aucune perte liée au compresseur n'a été considérée. Son rendement a donc été pris égal à 1 quel que soit le taux de compression recherché.

III.5. Fermentation

La fermentation en éthanol du sucre se fait selon les équations (11) et (12) pour, respectivement, le glucose $C_6H_{12}O_6$ et le saccharose $C_{12}H_{22}O_{11}$. Comme il a été vu à la section II.1.a ces réactions sont exothermiques, ce qui est indiqué par leur enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^0$ négative [120].



Note : la fermentation présentée par l'équation (12) se fait en réalité en deux étapes, une première d'hydrolyse du saccharose en glucose et fructose, et une seconde de fermentation de ces sucres à 6 carbones selon l'équation (11).

Des équations (11) et (12) il vient qu'il serait possible d'obtenir, respectivement, 0,51 et 0,54 kg d'éthanol à partir de 1 kg de sucre ; ces rendements théoriques sont également appelés rendements de Gay-Lussac. Plusieurs chercheurs, dont Pasteur en 1857, ont cependant montré que ces rendements théoriques ne pouvaient pas être atteints et qu'une part des sucres était transformée en d'autres produits (glycérol, huiles de fusel, etc) d'une part, et consommée par les levures d'autre part. Le rendement maximal prenant en compte ces pertes, ou rendement de Pasteur, est de 94,7 % du rendement théorique [8, 120]. Le rendement obtenu industriellement a été considéré ici comme étant de 92 % du rendement théorique [8].

III.6. Distillation

Le principe d'une distillation est de séparer un mélange en phase liquide, ici eau / éthanol, en exploitant les équilibres liquide-vapeur et les différences de volatilité des deux corps [115]. Comme

indiqué à la section II.1.a, l'objectif ici est de concentrer l'éthanol du vin de fermentation, de TAV inférieur à 12 %, en un flegme de TAV de 93 %, proche de l'azéotrope.

Le schéma d'une colonne de distillation à plateaux est donné en figure III.11. Dans le cas présent, puisque la température d'évaporation du flegme est inférieure à celle des vinasses, celui-ci est extrait en tête de colonne, en phase vapeur, étant destiné à une déshydratation sur tamis moléculaire. Chaque flux I est notamment caractérisé par son débit massique \dot{m}_I , sa teneur massique en éthanol x_I et son enthalpie massique h_I ; par souci de simplification il a été supposé ici que la teneur en éthanol des vinasses pouvait être considérée comme nulle. La chaleur \dot{Q}_B nécessaire à la distillation est fournie au bouilleur à la température T_B et la chaleur \dot{Q}_C est récupérée au condenseur à la température T_C lors de la condensation du reflux du flegme.

En régime stationnaire, le bilan d'énergie de la colonne permet de lier l'énergie à fournir Q_B aux autres grandeurs du système :

$$\dot{Q}_B + \dot{m}_V \cdot h_V = \dot{m}_W \cdot h_W + \dot{m}_F \cdot h_F + \dot{Q}_C \quad (13)$$

La seconde inconnue de l'équation (13) est la chaleur de condensation \dot{Q}_C à évacuer du système, directement proportionnelle au débit du reflux L à condenser. Le débit du reflux L est couramment exprimé sous la forme du taux de reflux R :

$$R = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_F} \quad (14)$$

Le dimensionnement de la colonne de distillation dépend du taux de reflux choisi. Ce choix est très généralement le résultat d'une optimisation économique ; en effet, plus le taux de reflux est grand, plus le nombre de plateaux à mettre en place pour réaliser la distillation est faible mais plus la chaleur à fournir au bouilleur est grande [115]. Toutes les valeurs de reflux ne sont cependant pas réalisables en pratique et il existe un taux de reflux minimum R_{\min} , correspondant à un nombre infini d'étages, en-dessous duquel le fonctionnement de la colonne n'est pas assuré.

Cette optimisation économique, faisant intervenir le coût de l'énergie, le coût de la colonne et le taux d'amortissement, n'a pas été réalisée pour le présent travail. Le taux de reflux R a alors été déterminé selon l'approximation suivante [115] :

$$\begin{aligned} R &= 1,5 \cdot R_{\min} & \text{si } R_{\min} < 1 \\ R &= 1,25 \cdot R_{\min} & \text{si } 1 \leq R_{\min} < 4 \\ R &= 1,1 \cdot R_{\min} & \text{si } R_{\min} \geq 4 \end{aligned} \quad (15)$$

Le taux de reflux minimum R_{\min} a été obtenu graphiquement selon la méthode de dimensionnement de Mac Cabe et Thiele [115]. Cette méthode exploite la courbe d'équilibre liquide-vapeur du mélange eau / éthanol afin de déterminer le nombre de plateaux nécessaires au fonctionnement de la colonne selon le taux de reflux choisi. La méthode complète est très bien expliquée dans la bibliographie et seuls seront donnés ici les éléments pertinents.

La figure III.12 présente un exemple, avec un TAV du vin de 12 %, d'obtention graphique du taux de reflux R_{\min} , à partir de la courbe d'équilibre liquide-vapeur et du tracé des droites opératoires d'alimentation et de concentration. La droite d'alimentation traduit la répartition du flux d'entrée du vin, au niveau du plateau d'alimentation, entre les tronçons de concentration et d'épuisement (voir figure III.11). Dans le cas présent, où il a été supposé que le vin de fermentation était introduit dans la colonne sous forme de liquide bouillant, la droite de concentration est une droite verticale coupant l'axe des abscisses à la valeur de la teneur molaire en éthanol x_V du vin.

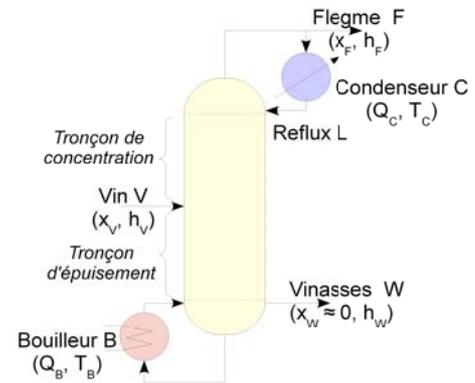


Figure III.11 - Schéma de fonctionnement de la distillation d'un mélange eau / éthanol

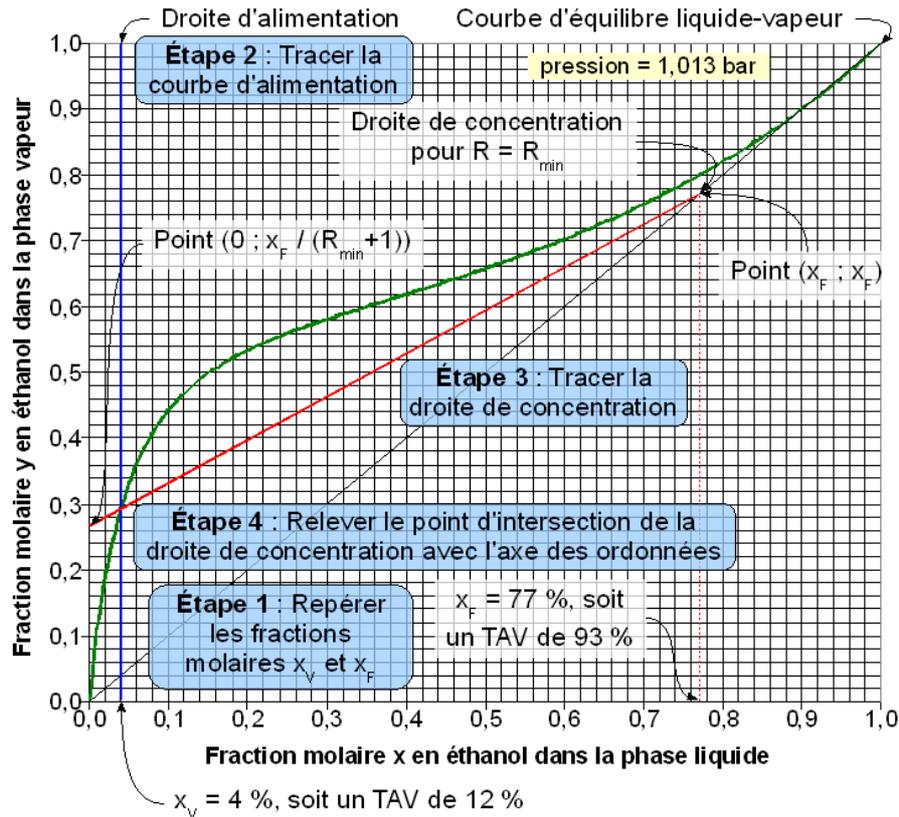


Figure III.12 - Exemple de détermination graphique du taux de reflux minimum selon la méthode de McCabe et Thiele

La droite opératoire de concentration lie la concentration en éthanol des vapeurs en fonction de la concentration du liquide et du taux de reflux, dans tout le tronçon de concentration. Graphiquement (voir figure III.12), cette droite passe par les points de coordonnées $(x_F; x_F)$ et $(0; x_F / (R+1))$.

D'après les éléments théoriques de la méthode de McCabe et Thiele, pour le taux de reflux minimum, la droite de concentration coupe la courbe d'équilibre au même point que la droite d'alimentation si ce point d'intersection entre droite de concentration et courbe d'équilibre est alors unique, ou est tangente à la courbe d'équilibre dans le cas contraire [115]. Une fois cette droite limite de concentration tracée, le taux de reflux minimum R_{\min} peut être obtenu à partir de la lecture de l'ordonnée à laquelle cette droite coupe l'axe des ordonnées, la teneur en éthanol du flegme x_F étant connue.

III.7. Évaporation

L'évaporation consiste à éliminer une certaine quantité d'eau, donnée comme objectif de l'étape, d'un liquide, ce qui permet de le concentrer. D'un point de vue énergétique, il s'agit donc de porter ce liquide à sa température d'ébullition et de fournir l'énergie nécessaire à la vaporisation partielle de l'eau qu'il contient.

La température d'ébullition du liquide est liée à la pression ambiante du réacteur et à l'activité de l'eau au sein du produit. En fonction notamment de la teneur en MS du liquide, cette activité tend à diminuer, ce qui provoque un retard à l'ébullition, par rapport à la température d'ébullition de l'eau pure à la même pression, appelé *élévation ébullioscopique* EE [115]. Cette élévation EE est par exemple de 4,5 °C pour le sirop de sucre issu de betterave à 68 % de MS²⁷ (voir section II.1.b). Ce phénomène a été supposé linéaire en fonction de la teneur en MS et commun pour les liquides à

²⁷ D'après Martine Decloux, 19 mars 2009, communication personnelle.

évaporer considérés dans la présente étude, soit le sirop de sucre et les vinasses clarifiées issues de la production d'éthanol à partir de blé (voir section II.1.d).

Dans le cadre du présent travail, l'évaporation est très généralement abordée en multiple effets, où la vapeur issue de l'évaporation du liquide dans un effet est valorisée par condensation dans l'effet suivant en vue de vaporiser la même quantité d'eau. Ainsi le recours à une évaporation en une quantité n d'effets permet en théorie de réduire n fois l'énergie nécessaire par rapport à un simple effet, correspondant à la chaleur latente de vaporisation de l'eau à évaporer [115].

Le couplage de vapeur entre effets est assuré en jouant sur les pressions des effets ou des vapeurs extraites, en les comprimant. Pour l'évaporation du sirop de sucre de betterave réalisée ici en 5 effets (voir section II.1.b), les pressions des effets ont été déterminées de sorte à limiter la température du sirop à 125 °C, afin de garantir une dégradation minimale de la qualité du produit [125].

III.8. Séchage

a) Sécheur à air par entraînement

De la même façon que pour l'étape d'évaporation, la base du calcul d'une opération de séchage est la détermination de la masse d'eau à évaporer, à partir de l'objectif donné de teneur en MS du solide. Ensuite, pour un sécheur classique à air, le calcul de l'énergie nécessaire est réalisé en déterminant la température de chauffage de l'air ambiant suffisante pour assurer le séchage.

La teneur en vapeur d'eau Y de l'air, en kg d'eau par kg d'air sec, peut s'exprimer en fonction de son humidité relative φ et de la pression de vapeur saturante de l'eau à la température considérée $p_{\text{sat}}(T)$ liées selon l'équation d'Antoine (9) vue à la section III.4, de la façon suivante [115] :

$$\begin{aligned} \text{Unités : } \varphi \text{ en } \%, p_{\text{sat}} \text{ en Pa et } & Y = \frac{0,622 \cdot p_{\text{sat}}(T) \cdot \varphi}{10\,132\,500 - p_{\text{sat}}(T) \cdot \varphi} \quad (16) \\ Y \text{ en kg d'eau par kg d'air} & \end{aligned}$$

En supposant que l'air ambiant utilisé présente une humidité relative φ de 50 % et que l'air en sortie du sécheur est saturé, il est ainsi possible d'exprimer, à partir de l'équation (14) et de la masse d'eau à évaporer, le débit d'air nécessaire en fonction de la température de l'air ambiant, connue, et de la température de l'air humide en sortie du sécheur.

Le fonctionnement du sécheur est supposé isenthalpique. Le produit à sécher, au fur et à mesure que l'eau qu'il contient s'évapore, voit sa température s'élever, ce qui permet de déterminer sa température finale et donc la température minimale de l'air. L'enthalpie massique de l'air H_{air} , exprimée en kJ / kg d'air sec, dépend de sa température T , en degrés Celsius °C, et sa teneur en vapeur d'eau Y , en kg d'eau par kg d'air sec, selon l'équation (15) suivante, l'enthalpie de référence étant prise pour un air sec et une eau liquide à 0 °C [115] :

$$H_{\text{air}} = \bar{C}_{p, \text{air}} \cdot T + Y \cdot (L_{\text{vap}, T=0^\circ\text{C}} + \bar{C}_{p, \text{vapeur}} \cdot T)$$

avec $\bar{C}_{p, \text{air}}$, $\bar{C}_{p, \text{vapeur}}$ et $L_{\text{vap}, T=0^\circ\text{C}}$ respectivement capacités calorifiques de l'air sec et de la vapeur d'eau et chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0 °C, prises égales pour les températures considérées ici à 1,01 et 1,92 kJ / kg / °C, et 2494 kJ / kg (17)

Exprimée de cette façon, c'est-à-dire ramenée au kg d'air sec, l'enthalpie massique de l'air H_{air} est constante au cours du séchage, ce qui permet de lier l'évolution de la teneur en eau de l'air et celle de sa température. La température nécessaire minimale et le débit de l'air chaud introduit dans le sécheur permettent alors de déterminer la quantité de chaleur à apporter lors du chauffage de l'air.

b) Sécheur par vapeur d'eau surchauffée

Paradoxalement, la vapeur d'eau peut également être utilisée comme agent séchant, à condition qu'elle soit *surchauffée*, c'est-à-dire que sa température soit supérieure à sa température de condensation. Ainsi la vapeur d'eau peut céder de la chaleur au produit à sécher sans se condenser.

Les pressions de travail utilisées ici ont été choisies selon les cas en fonction du contexte du procédé et des possibilités de valorisation de la vapeur issue du sécheur (voir plus loin). L'équation d'Antoine (9) permet ensuite de déterminer la température minimale au sein du sécheur. La quantité de chaleur à apporter au solide, liée à la masse d'eau à évaporer, lie alors le débit de vapeur d'eau surchauffée et sa température en entrée du sécheur.

La vapeur d'eau en sortie du sécheur a ici été supposée saturée. Son débit est plus important qu'en entrée du sécheur puisqu'est venu d'ajouter la masse d'eau évaporée du solide. Ainsi tandis qu'une part de cette vapeur est recyclée, après surchauffe, afin d'assurer le fonctionnement du sécheur, une quantité équivalente à la masse d'eau évaporée est extraite et sa chaleur latente peut généralement être valorisée pour d'autres étapes unitaires du procédé, selon sa structure et ses besoins.

IV. Résultats de simulation et d'ACV des procédés

Cette section présente les résultats des simulations et des bilans d'ACV, procédé par procédé. Les variantes technologiques et de valorisation des co-produits sont définies et leurs résultats comparés au scénario de référence, afin d'en déterminer les marges de progrès.

IV.1. Production d'éthanol à partir de betterave

a) Résultats du scénario de référence

Le tableau III.15 regroupe les besoins énergétiques du procédé, calculés à partir de la simulation du scénario de référence, et les résultats d'ACV associés de production d'éthanol à partir de betterave. Afin de respecter le fonctionnement particulier du procédé en deux périodes : la campagne, d'une durée de 90 jours, soit environ un quart de l'année, et l'inter-campagne le reste de l'année, les données du tableau III.15 ont été distinguées selon ces phases. Celles-ci sont toutefois intimement liées ; les besoins énergétiques en campagne notamment sont relatifs à la production d'éthanol mais également à la préparation du sirop qui sera utilisé en inter-campagne, dans un ratio de l'ordre de 3 kg de sucre traités pour conservation pour 1 kg de sucre fermenté.

Tableau III.15 - Besoins énergétiques et résultats d'ACV du scénario de référence de production d'éthanol à partir de betterave

	Besoins énergétiques du procédé (MJ / MJ)	Résultats d'ACV (MJ / MJ)	Résultats d'ACV (gCO ₂ -éq / MJ)
<i>Campagne</i>			
Charbon	0,98	1,07	95
Chaleur	1,30	1,63	82
Électricité	0,00		
Crédit lié aux co-produits	-	- 0,24	- 40
Total	-	2,47	136
<i>Inter-campagne</i>			
Chaleur	0,13	0,16	8
Électricité	0,04	0,10	5
Crédit lié aux co-produits	-	- 0,05	- 5
Total	-	0,21	7
<i>Bilan annuel</i>			
Charbon	0,24	0,26	23
Chaleur	0,42	0,60	30
Électricité	0,03		
<i>Sous-total</i>	-	<i>0,87</i>	<i>53</i>
Crédit lié aux co-produits	-	- 0,09	- 14
Total	-	0,77	39

Le résultat d'ACV relatif aux consommations énergétiques du procédé uniquement, de 0,87 MJ d'énergie primaire consommée par MJ d'éthanol produit, se situe au-delà des données de la

bibliographie. En effet le résultat médian et le troisième quartile de la bibliographie étudiée (voir chapitre II) pour l'étape de transformation sont respectivement de 0,64 et 0,72 MJ / MJ.

Cet écart s'explique par la consommation énergétique liée à l'utilisation de charbon pour le fonctionnement du four à chaux. Ce poste est effectivement absent des études analysées : les études *CCPCS '91* et *Ademe '02* considèrent une production d'éthanol intégrée à une sucrerie et ne présentent aucune donnée relative au four à chaux car elles affectent entièrement l'impact de cette étape à la production de sucre, et les études *Bio-Fit '00*, *GM '10*, *JRC '10* et *'15*, qui se placent, de la même manière que cette étude, dans le cadre d'une production isolée d'éthanol, ne recourent pas à un four à chaux pour la purification du jus sans toutefois indiquer la méthode utilisée [42, 43, 84, 83, 82, 85]. La bibliographie apparaît donc insuffisante sur ce point car :

- comme vu à la section II.1.b, l'affectation proposée par les études *CCPCS '91* et *Ademe '02* n'est pas justifiée puisque la co-production constitue une multi-fonctionnalité combinée et non jointe ; l'impact lié à la production d'éthanol dans de tels procédés est à déterminer par une simulation de l'ensemble du site de transformation et l'étude de variations marginales des volumes de production autour de points de fonctionnement donnés.
- les études *Bio-Fit '00*, *GM '10*, *JRC '10* et *'15*, tout comme la présente étude, sont limitées par le caractère virtuel du procédé étudié et donc par le manque de connaissances pratiques sur le processus de purification à adopter. D'une part, la consommation énergétique associée obtenue par ces études peut paraître sous-estimée puisqu'elles considèrent pour le jus issu de betterave un traitement proche de celui du jus sucré extrait de canne à sucre (voir section II.1.c) alors que ces deux jus ont une composition, notamment du point de vue des impuretés, assez différente [125]. D'autre part la consommation énergétique liée à cette purification obtenue dans le cadre de la présente étude peut paraître sur-estimée puisqu'elle vise pour la production d'éthanol une qualité de sirop identique à celle pour la production de sucre.

En l'absence d'éléments discriminants, l'hypothèse de traitement du jus et donc la consommation de charbon pour le four à chaux seront conservées. Du point de vue des consommations de chaleur et d'électricité, les résultats de la simulation réalisée sont satisfaisants car en accord avec la bibliographie. En effet, l'étude *JRC '15*, considérant le même procédé et en présentant les besoins globaux d'énergie, indique un besoin en chaleur du procédé de 0,54 MJ / MJ et en électricité de 0,04 MJ / MJ, soit tous deux 30 % plus importants que les résultats du tableau III.15. Cet écart peut s'expliquer par le caractère idéal des transformations simulées, sans pertes, et les consommations non prises en compte (voir section III).

De la même façon que pour les consommations énergétiques, le résultat d'ACV relatif aux émissions de gaz à effet de serre du procédé uniquement, c'est-à-dire sans prise en compte du crédit lié aux co-produits, est supérieur à la gamme standard disponible dans la bibliographie. En effet celui-ci est de 53 gCO_{2-éq} / MJ, tandis que d'après le chapitre II, les émissions médianes de l'étape de transformation sont de 28 gCO_{2-éq} / MJ, et les premier et troisième quartiles respectivement de 19 et 37 gCO_{2-éq} / MJ. Là encore l'écart présenté par la présente étude s'explique par le rôle joué par l'utilisation du charbon au sein du four à chaux : en excluant ce poste, les émissions de l'étape de transformation sont alors de 30 gCO_{2-éq} / MJ, à moins de 5 % de plus que la médiane issue de la bibliographie.

b) Analyse du scénario de référence et identification des variantes d'intérêt

Le tableau général III.15 souligne le caractère prédominant de la période de campagne dans le bilan global de la filière, et l'étude d'options technologiques propices à une réduction de la demande énergétique globale sera donc principalement réalisée sur le schéma de procédé en campagne (voir figure III.5, page 108). La figure III.13 présente les courbes composites obtenues lors de l'analyse énergétique de ce procédé.

Le pincement apparaît à 97 °C, soit au niveau du palier de la courbe chaude à 92 °C correspondant à la condensation de la vapeur issue du dernier effet de l'évaporateur. De part et d'autre de ce pincement, les principaux besoins et disponibilités en chaleur sont, respectivement, l'énergie à apporter pour surchauffer la vapeur de séchage des pulpes, de 1,03 MJ / MJ, de 134 à 300 °C, et la chaleur latente de condensation à 92 °C de la vapeur extraite de l'évaporateur, de 0,84 MJ / MJ. A une autre échelle, les autres flux situés au-delà du pincement sont le chauffage du jus clair en entrée de l'évaporateur et le refroidissement des condensats pour cette même étape, ainsi que l'énergie à apporter à 100 °C au premier effet de distillation, de 0,17 MJ / MJ.

Le couple évaporation / séchage des pulpes par vapeur d'eau surchauffée (VES), dénommé ainsi puisque comme vu à la section II.1.b la vapeur extraite du sécheur est utilisée au premier effet de l'évaporation, constitue donc l'élément central du bilan thermique du procédé. L'intérêt de l'introduction d'une compression mécanique de vapeurs (CMV) sur ces deux étapes apparaît donc comme une option intéressante à étudier.

Pour son caractère commun à l'ensemble des filières de production d'éthanol, la distillation est également un sujet d'étude intéressant du procédé. La technologie de référence de distillation à deux effets a donc été comparée à un fonctionnement en simple effet couplé à une compression mécanique de vapeurs, qui permet de valoriser à 100 °C au bouilleur l'énergie récupérée à 78,15 °C, température de condensation de l'azéotrope eau / éthanol, au condenseur. Contrairement à la première variante technologique relative au séchage des pulpes et l'évaporation du jus sucré, celle-ci s'applique aussi bien au procédé en période de campagne qu'en période d'inter-campagne.

Ceci définit donc trois variantes technologiques (1), (2) et (3), à comparer au scénario de référence (0). Les technologies de ces quatre scénarios sont synthétisées dans le tableau III.16.

Tableau III.16 - Définition des variantes technologiques d'étude du procédé de production d'éthanol à partir de betterave

Variante	(0)	(1)	(2)	(3)
Évaporation	5 effets	1 effet + CMV	5 effets	1 effet + CMV
Séchage	VES	VES + CMV	VES	VES + CMV
Distillation	2 effets	2 effets	1 effet + CMV	1 effet + CMV

Les différentes voies de valorisation envisageables des co-produits de cette filière ont été présentées à la section II.3. Deux variantes de valorisation (b) et (c) ont donc été comparées au scénario de référence (a). Ces trois scénarios sont décrits dans le tableau III.17.

Tableau III.17 - Définition des variantes de valorisation des co-produits du procédé de production d'éthanol à partir de betterave

Variante	(a)	(b)	(c)
Pulpes	Alimentation	Combustible	Méthanisation
Vinasse	Amendement	Combustible	Méthanisation

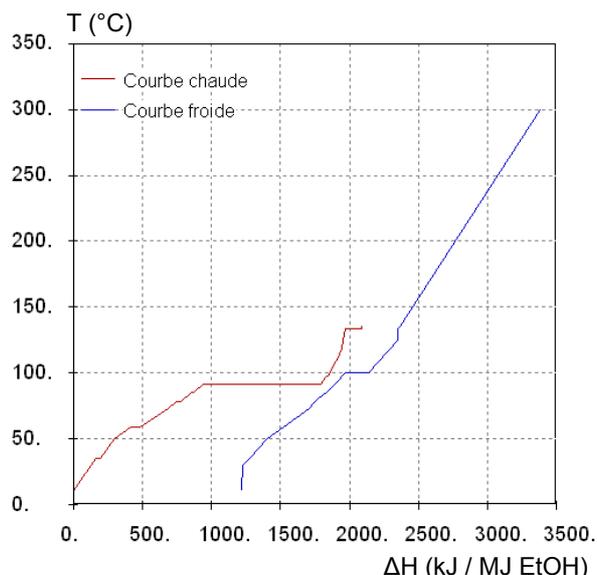


Figure III.13 - Courbes composites du procédé de référence de production d'éthanol à partir de betterave, en période de campagne

Note : l'incertitude portant sur la purification du jus sucré et le recours ou non à un four à chaux fonctionnant au charbon (voir section a) affecte de la même façon chacune des variantes étudiées. Le choix fait ici de conserver l'impact associé n'a donc pas de conséquence sur la hiérarchisation des scénarios obtenue.

c) Résultats d'ACV des scénarios d'étude

Les résultats d'ACV de l'ensemble des combinaisons des scénarios décrits à la section b précédente sont donnés aux tableaux III.18 et III.19 pour, respectivement, les consommations d'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre. Le scénario (0a) constitue la référence, décrite plus précisément à la section a précédente.

Ces résultats montrent de façon significative que l'influence des variantes de valorisation des co-produits est plus importante que celle des variantes technologiques étudiées ici. Ainsi la valorisation énergétique des co-produits peut s'avérer particulièrement intéressante, avec des diminutions d'impact pour le système étudié de plus de 70 % pour les consommations énergétiques et comprises entre 50 et 70 % pour les émissions de GES, par rapport aux scénarios (a). La comparaison entre les deux types de valorisation énergétique fait apparaître un léger avantage, en termes d'impact, pour les variantes (b) relatives à la combustion dans le cas des scénarios (0) et (2), et inversement pour les variantes (c) relatives à la méthanisation pour les scénarios (1) et (3).

Tableau III.18 - Résultats d'ACV relatifs à la consommation énergétique des scénarios de production d'éthanol à partir de betterave

En MJ par MJ EtOH	(a)	(b)	(c)
(0)	0,77	0,14	0,20
(1)	0,71	0,08	0,05
(2)	0,73	0,10	0,17
(3)	0,70	0,07	0,03

Bien qu'avec des écarts limités, les variantes technologiques se classent selon les quantités de chaleur valorisées par CMV, soit en impact décroissant (0), (2), (1) et (3). Ainsi l'introduction d'une CMV sur les étapes d'évaporation et de séchage apparaît plus pertinente, pour le procédé, que sur l'étape de distillation. Cette tendance est limitée par le fait que dans le cas des scénarios (1) et (3), les besoins en chaleur et en électricité deviennent si déséquilibrés que le recours à la cogénération n'est plus pertinent.

Tableau III.19 - Résultats d'ACV relatifs à l'émission de GES des scénarios de production d'éthanol à partir de betterave

En gCO ₂ -éq par MJ EtOH	(a)	(b)	(c)
(0)	39	17	20
(1)	35	12	12
(2)	37	15	18
(3)	34	11	10

L'introduction d'un traitement par méthanisation, sans toutefois rétablir l'équilibre, permet de limiter ce phénomène et donc de limiter les besoins en électricité du réseau. Ceci explique notamment l'intérêt des variantes (c) par rapport aux variantes de combustion (b) dans le cas des scénarios (1) et (3).

Enfin il est à noter que le scénario (3c), le plus performant en termes d'impact, permet une réduction des consommations d'énergie et des émissions de GES, par rapport à la référence (0a), de, respectivement, 0,74 MJ / MJ et 29 gCO₂-éq / MJ. Une telle réduction correspond à un site de transformation de la betterave très peu émetteur de GES et exportateur net d'énergie.

IV.2. Production d'éthanol à partir de blé

a) Résultats du scénario de référence

Le tableau III.20 regroupe les besoins énergétiques du procédé, calculés à partir de la simulation du scénario de référence, et les résultats d'ACV associés de production d'éthanol à partir de blé.

Tableau III.20 - Besoins énergétiques et résultats d'ACV du scénario de référence de production d'éthanol à partir de blé

	Besoins énergétiques du procédé (MJ / MJ)	Résultats d'ACV (MJ / MJ)	Résultats d'ACV (gCO _{2-éq} / MJ)
Chaleur	0,37	0,46	23
Électricité	0,02	0,05	2
<i>Sous-total</i>	-	<i>0,51</i>	25
Crédit lié aux co-produits	-	- 0,23	- 15
Total	-	0,28	10

Les valeurs données dans le tableau III.20 sont légèrement plus faibles que celles de la bibliographie. En effet les résultats d'ACV de l'étape de transformation uniquement sont, pour respectivement la consommation d'énergie primaire et les émissions de GES, de 0,51 MJ / MJ et de 25 gCO_{2-éq} / MJ, ce qui se situe, d'après l'étude du chapitre II, entre le premier quartile et la médiane des études considérées, soit respectivement entre 0,44 et 0,64 MJ / MJ et entre 19 et 28 gCO_{2-éq} / MJ.

Ceci traduit une sous-estimation du besoin en électricité dans le cadre de la présente étude. En effet, l'étude *JRC '15* indique une répartition des besoins du procédé en 0,36 MJ / MJ pour la chaleur, ce qui est en adéquation avec le résultat de 0,37 MJ / MJ simulé ici, et 0,06 MJ / MJ pour l'électricité [42]. De la même façon une étude d'ACV menée par le Lasen²⁸ de l'EPFL²⁹, pour la Suisse, en 2004, précise un besoin du procédé de transformation des céréales en éthanol de 0,41 MJ / MJ en chaleur et de 0,06 MJ / MJ en électricité. De plus cette étude détaille ces besoins par étape unitaire et donne notamment une consommation électrique cumulée de 0,03 MJ / MJ pour le broyage des grains en mouture, l'agitation des cuves de liquéfaction, saccharification et fermentation et la centrifugation des vinasses en sortie de distillation [138].

Ces différents éléments n'ayant pas été pris en compte dans le cadre de la présente étude, le besoin électrique du procédé est corrigé par ce besoin supplémentaire de 0,03 MJ / MJ. Les résultats alors obtenus, présentés dans le tableau III.21, sont ainsi plus représentatifs, ce qui se traduit notamment par un écart relatif aux médianes issues du chapitre II très limité.

Tableau III.21 - Besoins énergétiques et résultats d'ACV corrigés du scénario de référence de production d'éthanol à partir de blé

	Besoins énergétiques du procédé (MJ / MJ)	Résultats d'ACV (MJ / MJ)	Résultats d'ACV (gCO _{2-éq} / MJ)
Chaleur	0,37	0,46	23
Électricité	0,05	0,15	7
<i>Sous-total</i>	-	<i>0,61</i>	30
Crédit lié aux co-produits	-	- 0,23	- 15
Total	-	0,38	15

b) Analyse du scénario de référence et identification des variantes d'intérêt

La figure III.21 présente les courbes composites obtenues lors de l'analyse énergétique du procédé de production d'éthanol à partir de blé. La température de pincement est de 97,2 °C, soit 92,2 °C sur la courbe froide et 102,2 °C sur la courbe chaude.

28 Lasen : Laboratoire des systèmes énergétiques

29 EPFL : École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

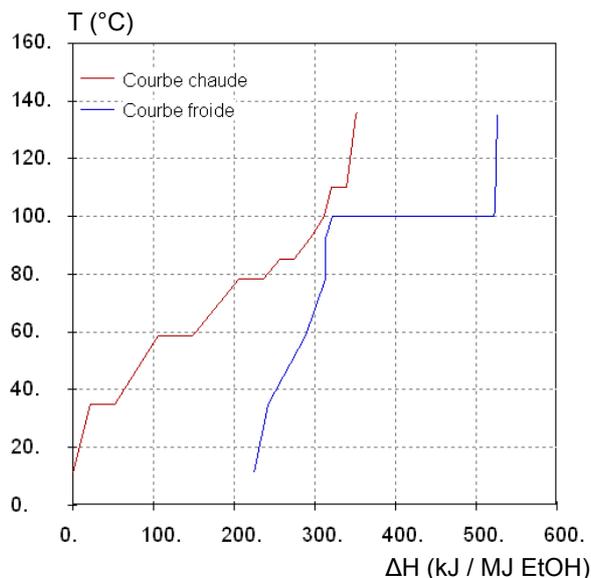


Figure III.14 - Courbes composites du procédé de référence de production d'éthanol à partir de blé

La courbe froide de la figure III.21 fait apparaître clairement que l'élément déterminant du besoin en chaleur est le palier de 0,15 MJ / MJ à 102 °C, correspondant à l'évaporation au sein du premier effet de l'étape de concentration des vinasses clarifiées, précédé d'un palier secondaire très légèrement décalé, de 0,05 MJ / MJ à 100 °C, dû à l'injection de vapeur à l'étape de liquéfaction.

Un dernier élément important du bilan thermique, absent de la figure III.21, est le séchage à l'air des drêches humides. Le besoin de chauffage de l'air, afin d'assurer le bon fonctionnement du sécheur, correspond à une consommation de chaleur de 0,19 MJ / MJ.

La correspondance entre le besoin en chaleur lu sur la figure III.21, principalement lié au premier effet de concentration, et le besoin en évaporation lié au séchage des drêches est remarquable. La possibilité d'introduction d'un séchage par vapeur

d'eau surchauffée (VES) des drêches apparaît donc comme une variante intéressante, autorisant une valorisation de la vapeur issue du sécheur en concentration, ce que le séchage à l'air ne permet pas.

Le tableau III.22 précise les principales caractéristiques des deux variantes technologiques (0) et (1) considérées ici pour la production d'éthanol à partir de blé.

Remarque : de la même façon que pour le procédé de production d'éthanol à partir de betterave (voir section IV.1.b), le fonctionnement de la distillation en simple effet couplé à une compression mécanique des vapeurs a pu être étudiée. Toutefois l'intérêt de cette variante apparaît comme limité compte tenu du couplage existant entre le dernier effet de la concentration des vinasses et la distillation. Les résultats de simulation, non présentés ici, ont confirmé ce phénomène en indiquant des gains de performances très faibles par rapport au fonctionnement en double effet, et non significatifs compte tenu des hypothèses formulées dans ce travail, notamment concernant le rendement des compresseurs (voir section III.4).

Tableau III.22 - Définition des variantes technologiques d'étude du procédé de production d'éthanol à partir de blé

Variante	(0)	(1)
Distillation	2 effets	2 effets
Concentration	3 effets	3 effets
Séchage	Air	VES

Trois variantes d'utilisation des drêches ont été considérées ici (voir section II.3) : alimentation animale, option de référence, combustion et méthanisation. Une quatrième variante a été introduite afin d'évaluer l'intérêt par rapport à la variante de référence d'une utilisation de la paille comme combustible pour fournir l'énergie nécessaire à la transformation. La description de ces quatre variantes (a), (b), (c) et (d) de valorisation des co-produits est donnée dans le tableau III.23.

Tableau III.23 - Définition des variantes de valorisation des co-produits du procédé de production d'éthanol à partir de blé

Variante	(a)	(b)	(c)	(d)
Paille	Amendement	Amendement	Amendement	Combustible
Drêches	Alimentation	Combustible	Méthanisation	Alimentation

Note : aucune des variantes étudiées ne modifie le fonctionnement des étapes de broyage, liquéfaction, saccharification, fermentation et centrifugation. La correction du besoin électrique précisée à la section a précédente est donc conservée pour tous les scénarios de procédé.

c) Résultats d'ACV des scénarios d'étude

Les résultats d'ACV relatifs à la consommation d'énergie primaire et aux émissions de GES des différents scénarios d'étude sont donnés respectivement dans les tableaux III.24 et III.25. Les scénarios (0c) et (1c) sont identiques et ont donc été regroupés ; en effet la valorisation des drêches humides par méthanisation supprime tout recours à une étape de séchage.

De la même façon que pour le procédé de production d'éthanol à partir de betterave, l'influence des variantes liées à la valorisation des co-produits sur les impacts étudiés est plus importante que celle des variantes technologiques. Toutefois l'introduction d'un séchage des drêches par VES possède un intérêt non négligeable vis-à-vis de la consommation énergétique et des émissions de GES du procédé puisqu'elle permet potentiellement de réduire celles-ci de, respectivement, 60 et 80 %.

La valorisation des drêches par combustion ou par méthanisation permet d'améliorer plus encore l'efficacité énergétique du procédé, jusqu'à en faire un exportateur net d'énergie pour les scénarios (c) et (1b). De ce point de vue, si le recours à la méthanisation apparaît comme le schéma de production le plus performant, la combustion des drêches après un séchage par VES permet d'atteindre des performances très proches.

Tableau III.25 - Résultats d'ACV relatifs à l'émission de GES des scénarios de production d'éthanol à partir de blé

En gCO ₂ -éq par MJ EtOH	(a)	(b)	(c)	(d)
(0)	15	5	-7	-3
(1)	3	-7		-8

variantes (c) et (1b). Concernant les résultats relatifs aux émissions de GES, l'intérêt des variantes (d) est partiellement compromis par la perte en MO du sol et le besoin accru en fertilisants artificiels, très émetteur en GES lors de leur fabrication, dus à la récolte de la paille. Les résultats finaux sont toutefois globalement équivalents à ceux des variantes (c) et (1b).

Pour le procédé de référence de production d'éthanol à partir de blé, chacune des voies d'amélioration étudiées se révèlent donc intéressantes, bien qu'à des niveaux différents, en vue d'une réduction de l'impact énergie / GES de l'étape de transformation. Toutefois mettre en place de nouveaux équipements sur site ou valoriser différemment les co-produits possèdent des implications très différentes pour les coûts de production. La section V, et plus précisément la section V.4.a pour l'éthanol de blé, complètera donc la présente analyse en comparant les coûts associés à ces variantes.

IV.3. Production d'éthanol à partir de canne à sucre

Le tableau III.26 présente les besoins énergétiques simulés du procédé de production d'éthanol à partir de canne à sucre.

Le résultat de besoin en électricité du procédé est excessivement faible et, de la même façon que pour le procédé de production d'éthanol à partir de blé (voir

Tableau III.24 - Résultats d'ACV relatifs à la consommation énergétique des scénarios de production d'éthanol à partir de blé

En MJ par MJ EtOH	(a)	(b)	(c)	(d)
(0)	0,38	0,11	-0,14	-0,18
(1)	0,14	-0,12		-0,20

Enfin l'étude des variantes (d) a montré que, sous l'hypothèse de 6 t de paille récoltée pour 9 t de grains (voir section II.1.d), la production de paille s'avérait suffisamment abondante pour assurer la fourniture d'énergie du site de transformation. En effet, la récolte des pailles sur 43 et 24 % des champs exploités pour, respectivement, les scénarios (0d) et (1d), garantit alors l'alimentation du site. Du point de vue des consommations énergétiques, ces deux variantes permettent d'atteindre des résultats d'ACV meilleurs que les

Tableau III.26 - Besoins énergétiques simulés du scénario de référence de production d'éthanol à partir de canne à sucre

	Besoins énergétiques du procédé (MJ / MJ)
Chaleur	0,16
Électricité	0,00

section IV.2.a), ceci s'explique notamment par la non prise en compte de besoins mécaniques tels qu'ici, ceux liés au fonctionnement de la déchiqueteuse et des moulins à rouleaux. Ces postes de consommation d'électricité peuvent être évalués à 0,02 MJ / MJ [130] et ainsi ajoutés aux résultats du tableau III.26.

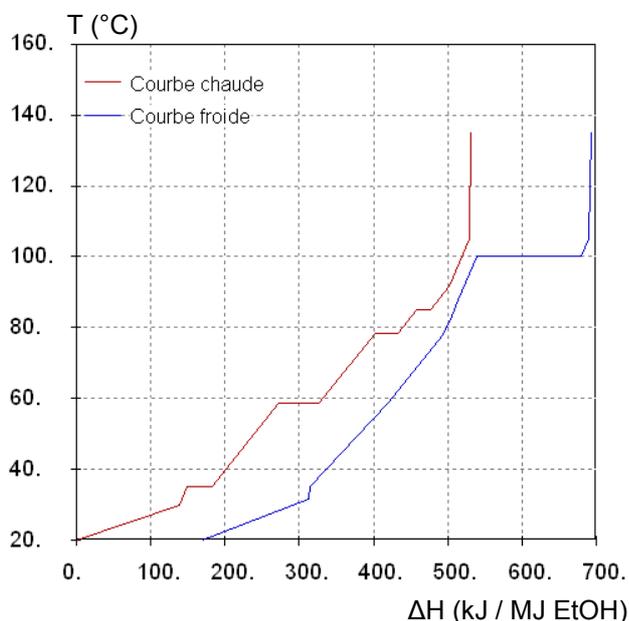


Figure III.15 - Courbes composites du procédé de référence de production d'éthanol à partir de canne à sucre

d'éthanol à partir de canne à sucre constitue donc d'ores et déjà la voie optimale en termes de valorisation des co-produits, du point de vue de la réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES. Le procédé en lui-même peut toutefois être encore amélioré, tant du point de vue des technologies utilisées que de son intégration thermique, ce qui permettrait une économie dans l'utilisation de la bagasse, utilisée alors comme source de production d'électricité [130, 131]. Cet objectif ne sera cependant pas étudié plus avant dans le cadre du présent travail.

IV.4. Production d'EMHV à partir de colza

Le chapitre II a montré que l'impact de la transformation des graines de colza en EMHV est limité. En effet les résultats d'ACV médians issus de la bibliographie se situent à une consommation d'énergie primaire de 0,23 MJ / MJ et une émission de GES de 9 gCO_{2-éq} / MJ. Ces impacts concernent le procédé de transformation et couvrent donc la transformation en EMHV mais également la production de deux co-produits : le tourteau et la glycérine. Le présent travail s'est attaché à comparer l'intérêt de différentes valorisations de ces co-produits.

La production de 1 kg d'EMHV, présentant un pouvoir calorifique inférieur de 37,2 MJ / kg, s'accompagne par celle de l'ordre de 1,3 kg de tourteau et de 0,1 kg de glycérine [42, 8]. En considérant les données présentées à la section II.3, les tableaux III.27 et III.28 présentent les impacts évités liés respectivement aux valorisations du tourteau et de la glycérine.

Tableau III.27 - Impacts évités liés à la valorisation du tourteau de colza

Voie de valorisation	Consommations d'énergie (MJ / MJ EMHV)	Émissions de GES (gCO _{2-éq} / MJ EMHV)
<i>Alimentation animale</i>	0,26	17
<i>Combustion</i>	0,58	29

Tableau III.28 - Impacts évités liés à la valorisation de la glycérine

Voie de valorisation	Consommations d'énergie (MJ / MJ EMHV)	Émissions de GES (gCO _{2-éq} / MJ EMHV)
<i>Alimentation animale</i>	0,00	1
<i>Chimie</i>	0,35	16
<i>Combustion</i>	0,05	2

A partir de ces différents types de valorisation, quatre variantes sont définies. Leurs caractéristiques sont données dans le tableau III.29, la variante (a) correspondant au scénario de référence.

Tableau III.29 - Définition des variantes de valorisation des co-produits du procédé de production d'EMHV à partir de colza

Variante	(a)	(b)	(c)	(d)
<i>Tourteau</i>	Alimentation	Alimentation	Alimentation	Combustible
<i>Glycérine</i>	Chimie	Alimentation	Combustible	Combustible

A partir des résultats médians d'impact du procédé, issus du chapitre II, et les résultats des tableaux III.27 et III.28, le tableau III.30 présente l'impact en termes de consommation énergétique et d'émissions de GES des trois scénarios (a), (b), (c) et (d).

La comparaison des scénarios (a), (b) et (c) montre que la valorisation actuelle de la glycérine dans les industries de la chimie est la plus intéressante d'un point de vue environnemental. Ainsi la saturation à prévoir des marchés de glycérine synthétique (voir section III.3.a du chapitre II) provoquera, dans les conditions aujourd'hui envisageables de valorisation de la glycérine, une hausse de l'impact global de la filière.

Une valorisation énergétique du tourteau, principal co-produit, en masse, de la filière, peut potentiellement permettre une nette amélioration des performances énergie / GES du procédé, tel que le montrent les données du tableau III.27. Ceci place alors les résultats du scénario (d) à un niveau similaire de ceux du scénario de référence (a) avec valorisation de la glycérine en chimie.

Tableau III.30 - Résultats d'ACV des scénarios de production d'EMHV à partir de colza

Variante	Résultats d'ACV, par MJ EMHV	
	Consommation énergétique (MJ)	Émissions de GES (gCO _{2-éq})
(a)	- 0,38	- 23
(b)	- 0,03	- 9
(c)	- 0,07	- 10
(d)	- 0,39	- 22

IV.5. Intérêt des variantes vis-à-vis des filières globales

Les sections IV.1 à IV.4 présentent, en valeur absolue, les améliorations attendues en termes de résultats d'ACV pour les différentes variantes étudiées. Du point de vue des filières, les impacts calculés correspondent à l'étape de transformation et au crédit d'affectation associé aux co-produits.

En exploitant les résultats du chapitre II, il est possible de replacer ces résultats par rapport aux bilans globaux des filières. Cette section vise donc à réaliser une telle comparaison en utilisant pour les étapes de culture, de séchage, de transport et de distribution, les résultats médians issus de la bibliographie et présentés au chapitre II précédent (voir figures II.8 et II.9), pour les filières européennes d'éthanol de betterave et de blé, et d'EMHV de colza.

a) Filière d'éthanol issu de betterave

La figure III.16 présente les résultats globaux d'ACV, en termes de consommations d'énergie et d'émissions de GES, des variantes étudiées pour la filière d'éthanol issu de betterave. Dans un souci de lisibilité et compte tenu de leur intérêt limité (voir section IV.1.c), les variantes (2) n'ont pas été

représentées. Les résultats donnés sous le nom de *Bibliographie* correspondent aux résultats médians issus de l'analyse bibliographique du chapitre II.

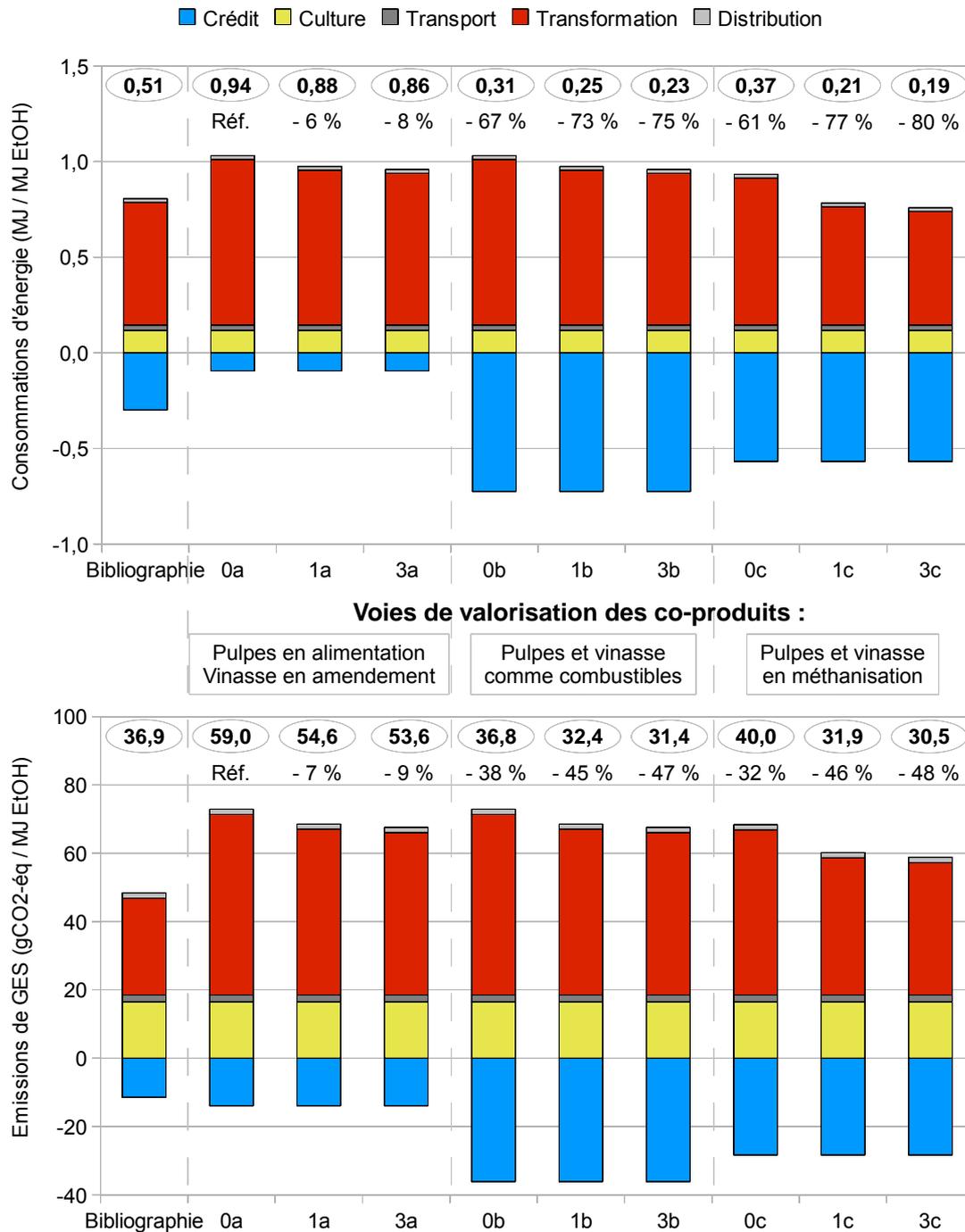


Figure III.16 - Intérêt des variantes étudiées pour les résultats globaux d'ACV de la filière d'éthanol de betterave

Les résultats de la variante de référence (0a) sont plus importants que ceux issus de la bibliographie d'un facteur 1,6 (émissions de GES) à 1,8 (consommations d'énergie). Ceci s'explique par le rôle du charbon dans le four à chaux (voir section IV.1.a), accentué, pour l'indicateur des consommations d'énergie, par le choix de règle d'affectation (impacts évités) et de voie de valorisation des co-produits.

Les améliorations technologiques du procédés (variantes (1a) et (3a)) permettent une réduction d'impact de l'ensemble de la filière de 6 à 9 %, ce qui n'est pas négligeable. Toutefois, la valorisation énergétique des co-produits, en accentuant nettement le rôle des co-produits dans le bilan final, permet d'atteindre des niveaux de réduction bien supérieurs, de 61 et 67 % pour les

consommations d'énergie et de 32 et 38 % pour les émissions de GES pour, respectivement, les variantes (0c) (méthanisation) et (0b) (combustion).

Enfin l'impact de la filière le plus faible est observé lorsque sont combinées une amélioration du procédé et une valorisation des pulpes et vinasse par méthanisation (variante (3c)). Cette configuration permet alors une réduction des impacts globaux, par rapport à la situation actuelle de référence, de 80 % pour les consommations d'énergie et de 48 % pour les émissions de GES.

b) Filière d'éthanol issu de blé

De la même façon que la figure III.16, la figure III.17 présente les résultats d'ACV, représentatifs de la filière globale d'éthanol de blé, dans le cas des différentes variantes étudiées.

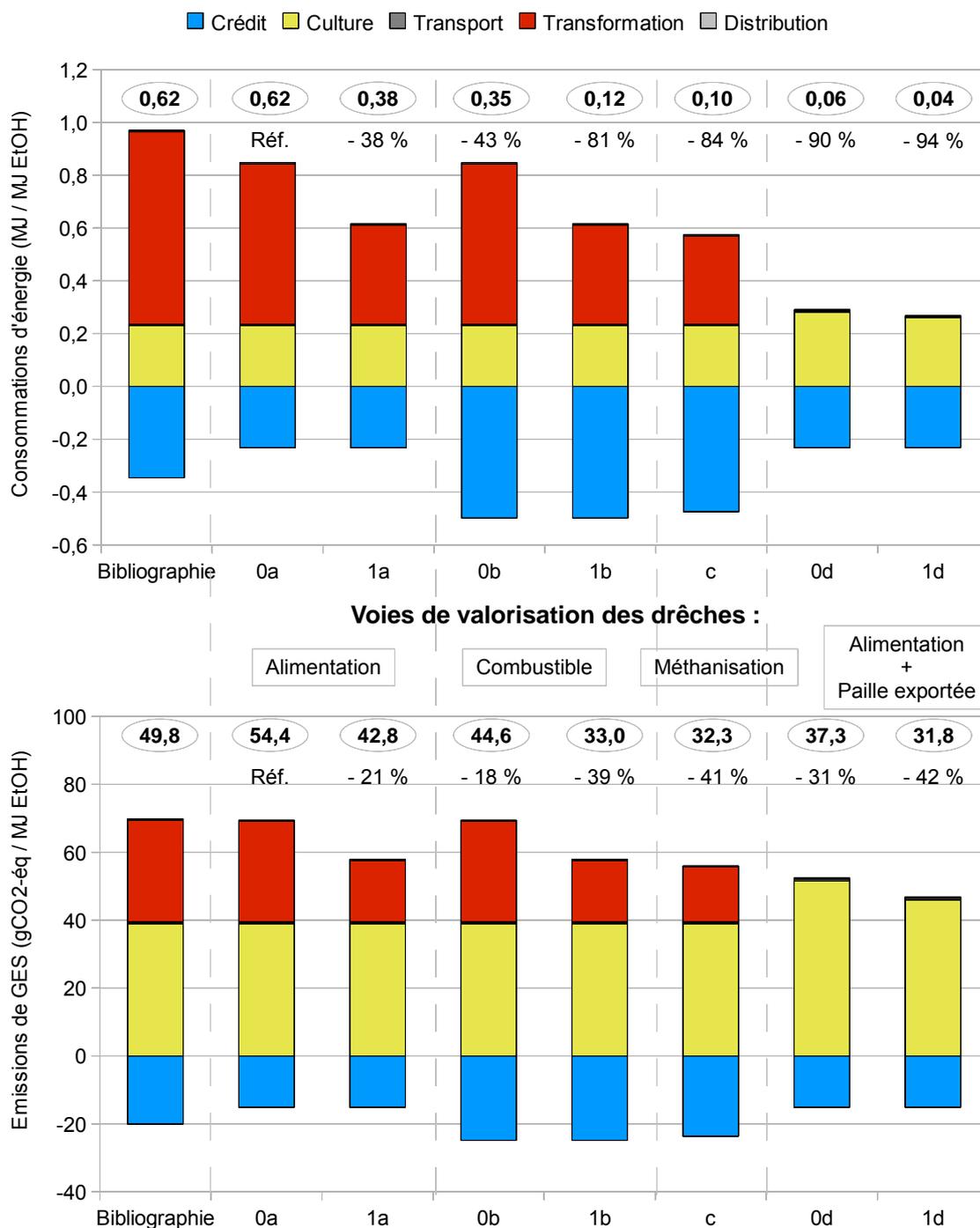


Figure III.17 - Intérêt des variantes étudiées pour les résultats globaux d'ACV de la filière d'éthanol de blé

Les résultats de la variante de référence (0a) sont proches de ceux issus de l'analyse bibliographique du chapitre II. Concernant les consommations d'énergie, les deux valeurs sont même identiques, masquant toutefois une différence de 0,12 MJ / MJ EtOH, présente à la fois sur les résultats associés à la transformation et au crédit d'affectation et se compensant mutuellement. Pour les émissions de GES, les résultats du scénario (0a) sont supérieurs à ceux issus de la bibliographie de 9 %, ceci étant dû au moindre crédit d'affectation et donc aux choix méthodologiques relatifs à l'affectation réalisés ici.

L'intégration au procédé d'un sécheur des drêches par VES permet une réduction appréciable de l'impact de la filière dans son ensemble puisque celle-ci se chiffre à 38 % pour les consommations d'énergie et à 21 % pour les émissions de GES (variante (1a)). La valorisation comme combustible des drêches, séchées de façon traditionnelle (variante (0b)), présente un potentiel similaire avec une diminution de 43 % des consommations énergétiques et de 18 % des émissions de GES.

La combinaison d'un séchage des drêches par VES et d'une valorisation comme combustible (variante (1b)), ainsi que la valorisation humide des drêches par méthanisation (variante (c)), autorisent des réductions d'impact environ deux fois plus importantes puisque celles-ci sont de, respectivement, 81 et 84 % pour les consommations d'énergie, et de 39 et 41 % pour les émissions de GES. Seule l'exportation des pailles afin de fournir l'énergie nécessaire au procédé permet des économies plus importantes, malgré l'impact plus grand de l'étape de culture dû au besoin accru en éléments minéraux et à la perte en MO, jusqu'à atteindre 94 % pour les consommations d'énergie et 42 % pour les émissions de GES (variante (1d)).

c) Filière d'EMHV issu de colza

La figure III.19, page suivante, présente les résultats d'ACV, en termes de consommations d'énergie et d'émissions de GES, de la filière globale d'EMHV de colza selon les différentes variantes étudiées.

Les résultats de la variante de référence (a) sont nettement inférieurs aux médianes issues de la bibliographie. La valeur retenue pour le crédit d'affectation associé à la glycérine en est essentiellement à l'origine et conduit à des résultats globaux de la filière inférieurs de 0,35 MJ / MJ et de 12,2 gCO_{2-éq} / MJ par rapport à l'analyse du chapitre II.

De telles valeurs ne peuvent être retrouvées par une valorisation de la glycérine en alimentation ou en tant que combustible, voies qui pourraient être retenues si le marché actuel de la glycérine venait à être saturé et qu'aucune utilisation innovante de celle-ci n'était découverte (voir chapitre II, section III.3.a). De ces deux valorisations, l'utilisation de la glycérine comme combustible (variante (c)) en est aujourd'hui la plus intéressante du point de vue des bilans ACV ; toutefois, en comparaison avec la variante (a) de référence, ceci provoquerait une hausse de l'impact de la filière de 0,30 MJ / MJ et de 13,3 gCO_{2-éq} / MJ, soit une augmentation de 44 % pour ce dernier indicateur. Ces valeurs montrent clairement qu'il est important d'intégrer aux réflexions et à la définition d'objectifs de production d'EMHV la situation actuelle et future des marchés de glycérine.

Note : cet élément confirme la plus grande pertinence du choix d'une affectation par substitution des impacts évités que par prorata physique pour des enjeux de décision publique. En effet une affectation par prorata physique ne peut rendre compte de cette problématique de saturation de marchés, pourtant essentielle à une définition pertinente d'objectifs de réduction.

Une méthode d'affectation par prorata économique est dans ce cas également plus pertinente qu'un prorata physique, puisqu'elle tient compte du contexte des filières. En traduisant correctement la saturation du marché par une chute de la valeur de la glycérine, ce type de méthode peut alors traduire l'influence de cet enjeu pour la pertinence des bilans environnementaux de la filière.

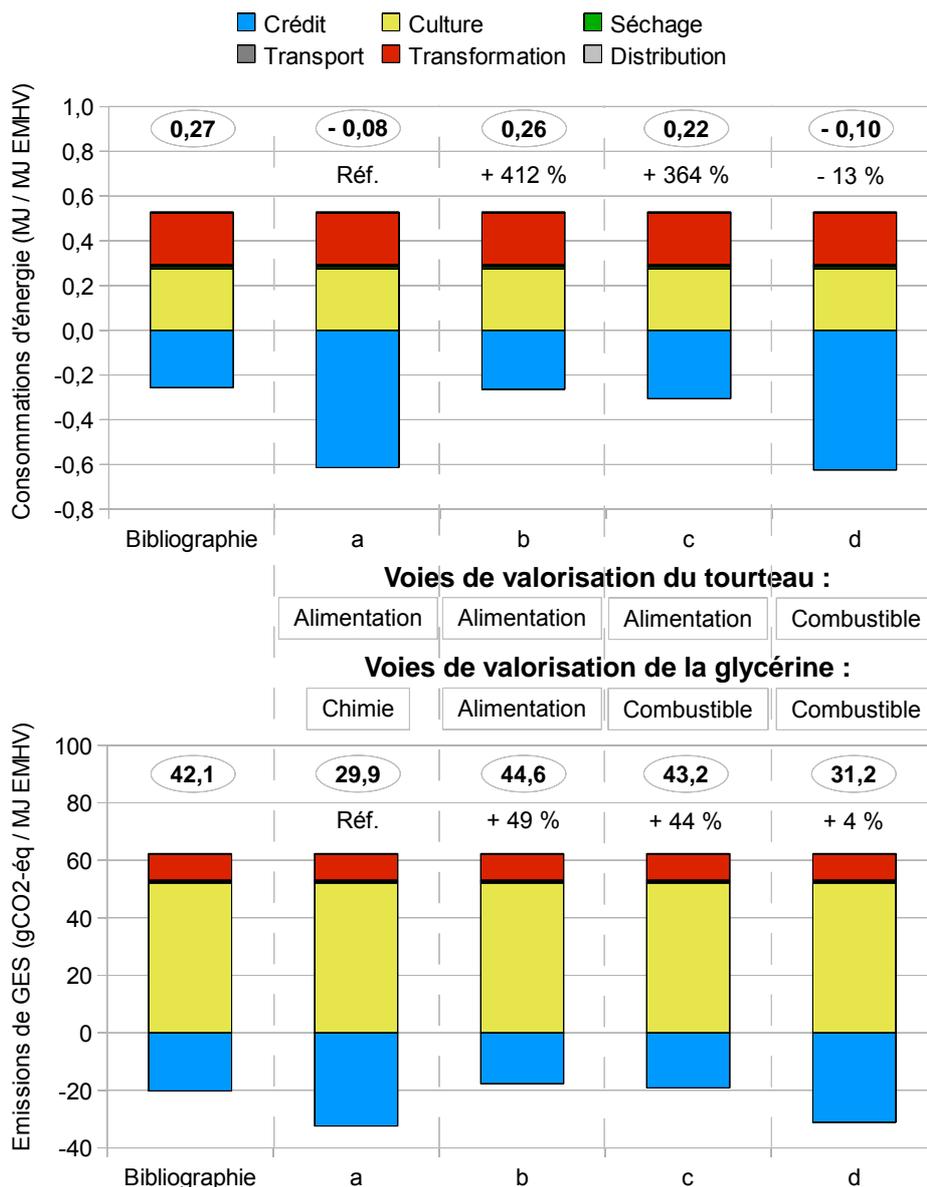


Figure III.18 - Impact des variantes étudiées sur les résultats globaux d'ACV de la filière d'EMHV de colza

Une valorisation du tourteau comme combustible, considérée via la variante (d), peut permettre d'atteindre des performances, au sens des bilans d'ACV de la filière, proches de celles de la variante de référence (a). En effet les résultats obtenus sont alors inférieurs de 13 % pour les consommations énergétiques et supérieurs de 4 % pour les émissions de GES. Toutefois le chapitre IV suivant montrera que si les indicateurs d'ACV, exprimés par MJ d'EMHV produit, sont alors relativement équivalents, il n'en est pas de même de l'usage des sols des deux schémas de production, bien plus pénalisant pour la variante (d) que pour la variante (a) (voir chapitre IV, section III).

V. Analyse des coûts de production des carburants végétaux

Cette dernière section du chapitre vise à distinguer sur un plan économique les variantes définies et comparées, du point de vue de leur bilan d'ACV, à la section IV précédente. Le champ de l'étude est l'Union Européenne et les carburants végétaux étudiés sont donc l'éthanol issu de betterave et de blé et l'EMHV issu de colza.

V.1. Structure des coûts de production

L'ensemble des coûts présentés dans cette section sont représentatifs d'un marché de l'énergie à 50 € le baril. Les enjeux de ce marché seront présentés plus en détails à la section V.2 suivante.

a) Coûts d'investissement

Les coûts d'investissement désignent les frais associés à l'installation du site industriel. Les gammes issues de la littérature et les valeurs retenues pour cette étude, exprimées en fonction de la capacité de production installée, sont données dans le tableau III.31, pour des procédés représentatifs des scénarios de référence considérés ici (voir sections II.1 et II.2) [8, 157, 158].

Tableau III.31 - Coûts d'investissement des procédés de référence étudiés, exprimés par capacité de production installée

Procédé	Coûts d'investissement par capacité de production installée (en € / (t / an))	
	Gamme issue de la littérature	Valeur considérée pour l'étude
EtOH ex betterave	530 - 680	605
EtOH ex blé	660 - 710	685
EMHV ex colza	320 - 440	385

Ces frais d'investissement sont répartis annuellement selon un mode d'amortissement linéaire, pour une durée de vie de 20 ans. Ceci correspond donc à un taux d'amortissement de 5 %.

Pour l'étude des variantes des procédés, il sera supposé en première approximation un surcoût constant par étape unitaire modifiée ou ajoutée, de l'investissement initial par rapport au schéma de référence. Ce surcoût est estimé à 240 € / (t / an) [157], soit une valeur relativement élevée par rapport aux données du tableau III.31.

b) Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation peuvent être distingués en deux types : les frais associés à la maintenance et au personnel, et les coûts des matières premières utilisées.

Les frais de maintenance sont estimés ici à partir des coûts d'investissement. Ainsi il est supposé que chaque année, la maintenance représente 3 % des coûts initiaux de construction pour les scénarios de référence et 4,5 % pour les variantes entraînant une modification du schéma de procédé. Ces deux valeurs différentes reflètent la différence de maturité des technologies. Les coûts de personnel sont supposés négligeables devant l'estimation des frais de maintenance.

Tableau III.32 - Coût de référence des matières premières non végétales

Matière première	Coût de référence (€ / GJ)
Charbon	2,5
Gaz naturel	7,3
Électricité	21,4
Méthanol	13,5

Les besoins en matière première végétale, en gaz naturel, en électricité et en charbon des procédés de production d'éthanol à partir de betterave et de blé sont issus des simulations de la présente étude. Le coût des matières premières végétales a été considéré comme des variables du système et les enjeux relatifs à ce marché sont présentés à la section V.3. Les coûts de référence utilisés des matières premières non végétales sont donnés dans le tableau III.32 [157].

Concernant la production d'EMHV à partir de colza, les consommations de gaz naturel, d'électricité et de méthanol du procédé sont issues de la bibliographie et intégrées aux calculs économiques à l'aide des données du tableau III.32 [42]. La consommation de produits chimiques, importante pour ce type de filières, n'ayant pu être chiffrée précisément, un coût global associé a été considéré, de 42,1 € / t d'EMHV, soit 1,13 € / GJ [8].

c) Valorisation des co-produits

L'ensemble des frais présentés aux sections a et b précédentes permet la production du carburant végétal d'une part, et des co-produits d'autre part. Le prix de vente de ces derniers doit donc être intégré aux calculs de coût de production des carburants. Pour cela il a été supposé que leur prix de vente est en équilibre avec les produits qu'ils substituent, selon les équivalences présentées à la section II.3.

Les valorisations énergétiques des co-produits se substituent à l'utilisation de gaz naturel, dont les données et les enjeux sont présentés aux sections V.1.b et V.2. Les prix de vente considérés pour les produits valorisés en alimentation animale sont donnés à la section V.3.

Les prix des éléments fertilisants ont été estimés à partir des données disponibles de la FAO, soit pour les années 2002 à 2007, et l'évolution du prix du baril pour ces mêmes années [129, 159]. Les coûts de référence obtenus par élément nutritif sont donnés dans le tableau III.33.

Tableau III.33 - Coût de référence équivalent des engrais par élément fertilisant

Élément fertilisant	Coût de référence (€ / t élément)
Azote N- _{éq}	555,2
Phosphore P ₂ O _{5-éq}	9,8
Potassium K ₂ O- _{éq}	38,5

Enfin, compte tenu des enjeux portant sur le marché de la glycérine, son prix sur le marché a été pris comme un paramètre du système. A de faibles niveaux de production d'EMHV, le prix de la glycérine varie entre 400 et 800 € / t, après une purification pouvant représenter un coût de l'ordre de 300 € / t [42, 8, 160]. En considérant une production importante d'EMHV, les estimations de stabilisation du prix de la glycérine issue des procédés de production d'EMHV se situent généralement entre 120 et 130 € / t [157, 158]. Deux valeurs ont donc été considérées pour le prix de la glycérine : 300 € / t, comme valeur de référence, ou historique, et 125 € / t.

Note : le marché de la glycérine est le seul où a été considéré un impact des quantités de co-produits issues des filières de carburants végétaux. Tous les marchés de valorisation seraient en réalité affectés, mais cet effet a été supposé négligeable devant les incertitudes existantes sur ces marchés (voir notamment sections V.2 et V.3 suivantes).

V.2. Marché de l'énergie

Le prix du baril de pétrole est un indicateur important du coût de l'énergie mais également, plus généralement, du coût de nombreux produits. Un facteur F_{baril} a donc été pris en compte, visant à refléter les fluctuations du baril affectant les prix de référence donnés à la section V.1. Ce facteur est défini de telle façon qu'une variation de x % du prix du baril implique une variation de $x \cdot F_{\text{baril}}$ % du prix du produit considéré.

Ce facteur F_{baril} est issu de la bibliographie pour le charbon, le gaz naturel, l'électricité, le méthanol et les coûts d'investissement [157]. Concernant les engrais, ce facteur a été déterminé par l'analyse des données disponibles issues de la FAO pour le prix des éléments fertilisants entre 2002 et 2007 et de la DIREM³⁰ pour les

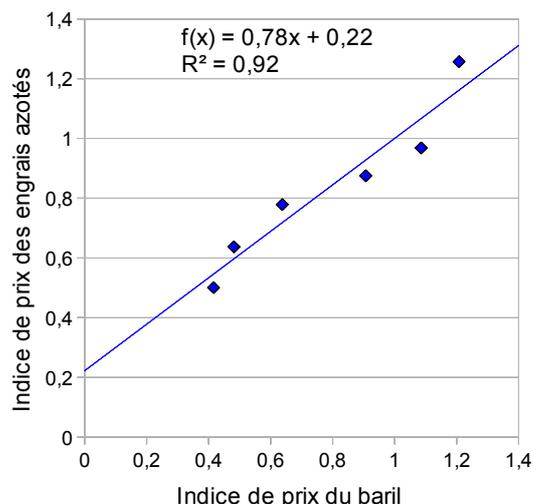


Figure III.19 - Corrélation entre le prix des engrais azotés et le prix du baril de pétrole, données constatées 2002-2007

30 DIREM : Direction des Ressources Énergétiques et Minérales, Ministère de l'Économie, des Finances et de

fluctuations du prix du baril [129, 159]. La figure III.28 présente notamment les données relatives aux engrais azotés, pour lesquels la corrélation est la meilleure et l'impact sur les coûts de production le plus important. Les indices du prix du baril et de l'engrais ont été définis pour une référence de prix du baril à 50 €.

Enfin, les prix de l'essence et du gazole sont considérés directement indexés sur le prix du baril, soit un facteur F_{baril} de 1 pour ces deux produits. Les prix constatés sont généralement compris, sur une base massique, entre 1,2 et 1,4 fois celui du pétrole brut [157] ; une valeur de 1,3 a ici été considérée.

Le tableau III.34 regroupe l'ensemble des facteurs F_{baril} utilisés pour les différents produits considérés.

Tableau III.34 - Facteurs F_{baril} utilisés des produits considérés

Produit	Facteur F_{baril}	Produit	Facteur F_{baril}
Charbon	0,65	Engrais azotés $N_{\text{-}éq}$	0,8
Gaz naturel	1	Engrais phosphatés $P_2O_5\text{-}éq$	0,6
Électricité	0,5	Engrais potassiques $K_2O\text{-}éq$	0,8
Méthanol	0,4	Essence	1
Coûts d'investissement	0,1	Gazole	1

V.3. Marché des produits agricoles

Le marché des produits agricoles suit une dynamique différente du marché de l'énergie car il dépend de phénomènes plus variés [161] : prix de l'énergie via la chaîne de production mais également aléas climatiques, régulations politiques, niveau des stocks mondiaux, spéculation, etc. De plus la demande liée aux objectifs de production des carburants végétaux peut également avoir un impact potentiellement fort sur le prix des matières premières [162].

Les prix des produits agricoles sont donc pris comme des paramètres du système. Toutefois, afin de limiter le nombre de variables, des relations ont été recherchées entre le prix de vente des co-produits valorisés en alimentation animale et le prix de la matière végétale de référence (blé, betterave ou colza). Les fluctuations de ces prix entre 1980 et 2006 ou 2007, selon les données disponibles, ont donc été étudiées afin de tenter d'établir des corrélations entre elles [129].

D'après le tableau III.11 (section II.3.c, page 117), il a ainsi été comparé les prix du blé à ceux du tourteau de soja, de la betterave au blé, et du colza au blé et au tourteau de soja. Les figures III.20 à III.22 présentent les fluctuations étudiées pour le blé, la betterave et le colza, De cette analyse il vient que :

- les prix du blé et du tourteau de soja présentent la meilleure corrélation sur l'ensemble de la période considérée (figure III.20), avec un rapport entre le prix du tourteau et le blé variant entre 1,10

l'Industrie.

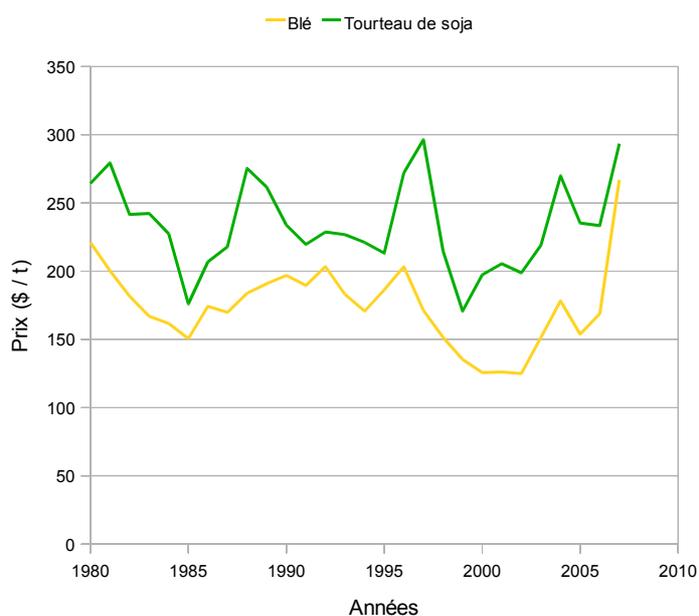


Figure III.20 - Fluctuations des prix du blé et du tourteau de soja, période 1980-2007

et 1,73 selon les années ; la valeur médiane des résultats, de 1,35, a été considérée dans le cadre de cette étude des coûts de production,

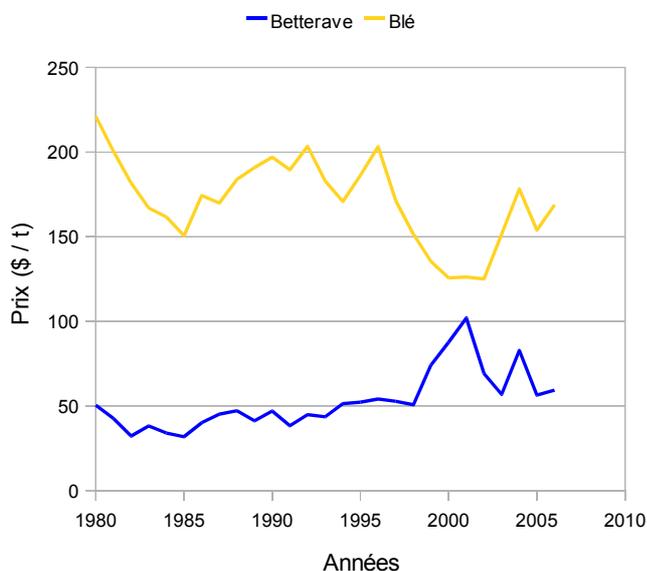


Figure III.21 - Fluctuations des prix de la betterave et du blé, période 1980-2006

- les prix de la betterave et du blé apparaissent comme très peu corrélés, ce qui s'explique par le caractère très réglementé du marché du sucre (figure III.21) ; aucune relation entre ces deux grandeurs n'a donc été considérée et la sensibilité des résultats présentés à la section V.4.b au prix du blé a été mesurée par la prise en compte de deux hypothèses de prix à 100 et 250 € / t, et

- les prix du colza semblent partiellement liés avec ceux du blé et du tourteau de soja mais avec deux phases distinctes : un niveau de prix fort du colza par rapport à ces deux produits de 1980 jusqu'à 1992-1993, puis un niveau plus faible à partir de ces dates (figure III.22) ; les corrélations ont alors été établies sur la période 1994-2007, avec

un rapport médian de 0,61 entre les prix du colza et du blé, pour une gamme de 0,50 à 0,70, et de 0,83 entre ceux du colza et du tourteau de soja, pour une gamme de 0,71 à 1,09.

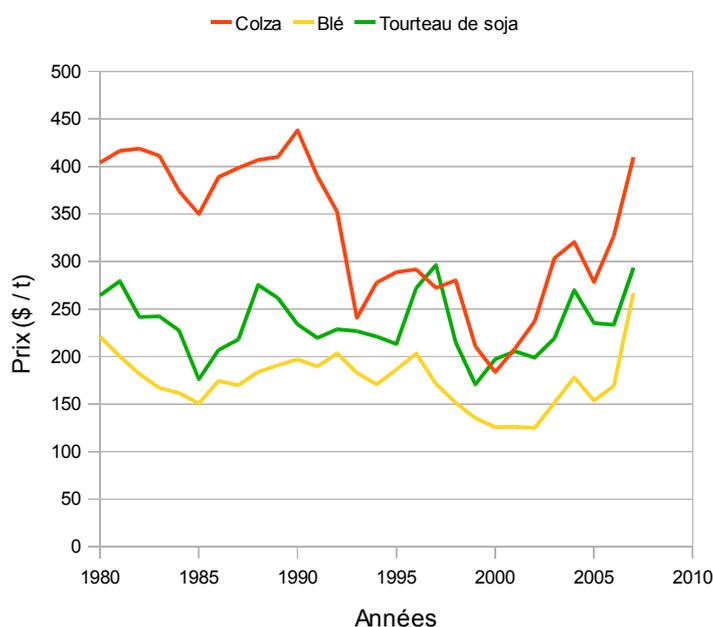


Figure III.22 - Fluctuations des prix du colza, du blé et du tourteau de soja, période 1980-2007

Enfin, les figures III.20 à III.22 permettent également de définir les gammes et valeurs de référence des prix du blé, de la betterave et du colza utilisées dans la suite de ce travail. Ainsi les coûts de production de l'éthanol à partir de blé ont été étudiés pour un prix de référence du blé de 150 € / t pour une gamme de 100 à 300 € / t, de 40 € / t pour la betterave pour une gamme de 30 à 90 € / t et de 230 € / t pour le colza avec une gamme de 150 à 350 € / t.

V.4. Analyse des résultats de coûts de production

Cette dernière section présente les résultats de coûts de production obtenus pour les différentes variantes d'étude des procédés de production d'éthanol à partir de blé et de betterave et d'EMHV à partir de colza, à partir des hypothèses formulées aux sections V.1 à V.3 précédentes.

Note : la définition et la dénomination des différentes variantes d'étude de chacune des filières sont reprises de la section IV précédente.

a) Production d'éthanol à partir de blé

Les coûts de production des variantes (0a), (1a), (0b), (1b) et (c) du schéma de production d'éthanol à partir de blé sont étudiés dans cette section. Les variantes (0d) et (1d), relatives à la combustion des pailles pour fournir l'énergie du procédé, n'ont pas été intégrées dans le présent travail compte tenu des incertitudes qui pèsent sur le prix d'achat de la paille si son usage énergétique se développe.

La figure III.23 présente l'évolution des coûts de production de l'essence et de l'éthanol de blé, selon différents schémas de production, en fonction du prix du baril et pour un prix du blé fixé à 150 €/t.

Sous les hypothèses effectuées, l'éthanol devient compétitif avec l'essence à partir d'un prix du baril de l'ordre de 90 à 100 €. Au-delà d'un tel prix les schémas de production les plus intéressants d'un point de vue économique sont les variantes (1b) et (c), à la fois efficaces et valorisant les drêches de façon énergétique. L'écart entre ces deux variantes, ici légèrement à l'avantage de la méthanisation, est lié essentiellement aux coûts d'investissement, qui devraient donc être pris en compte plus finement pour une analyse plus précise.

A des niveaux de prix du baril plus bas, la valorisation des drêches en alimentation animale est plus intéressante d'un point de vue économique que leur valorisation énergétique. L'amélioration énergétique des procédés, via la variante (1a), devient ici intéressante d'un point de vue économique à partir d'un prix du baril de l'ordre de 40 €. Toutefois de la même façon que pour la comparaison entre les variantes (1b) et (c), ce niveau de rentabilité dépend des hypothèses formulées sur les coûts d'investissement.

Ces différents niveaux de rentabilité entre variantes ou entre essence et éthanol sont bien évidemment modifiés lorsque le prix de marché du blé varie. Afin de traduire ce phénomène, la figure III.24 représente les zones de compétitivité des carburants en fonction du prix du baril et du prix du blé, pour l'éthanol de blé uniquement (figure III.24a) et pour l'éthanol et l'essence (figure III.24b).

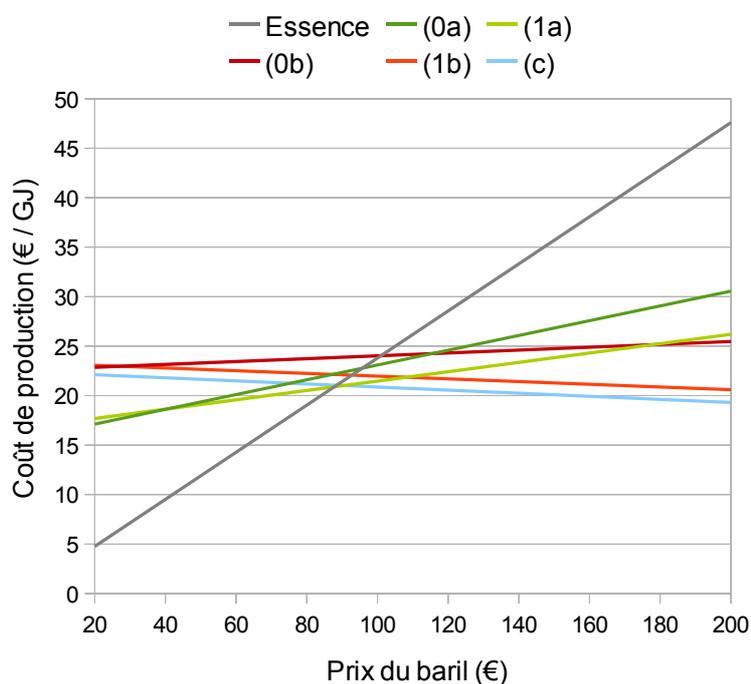


Figure III.23 - Évolution des coûts de production de l'éthanol de blé en fonction du prix du baril et pour un prix du blé fixé à 150 €/t

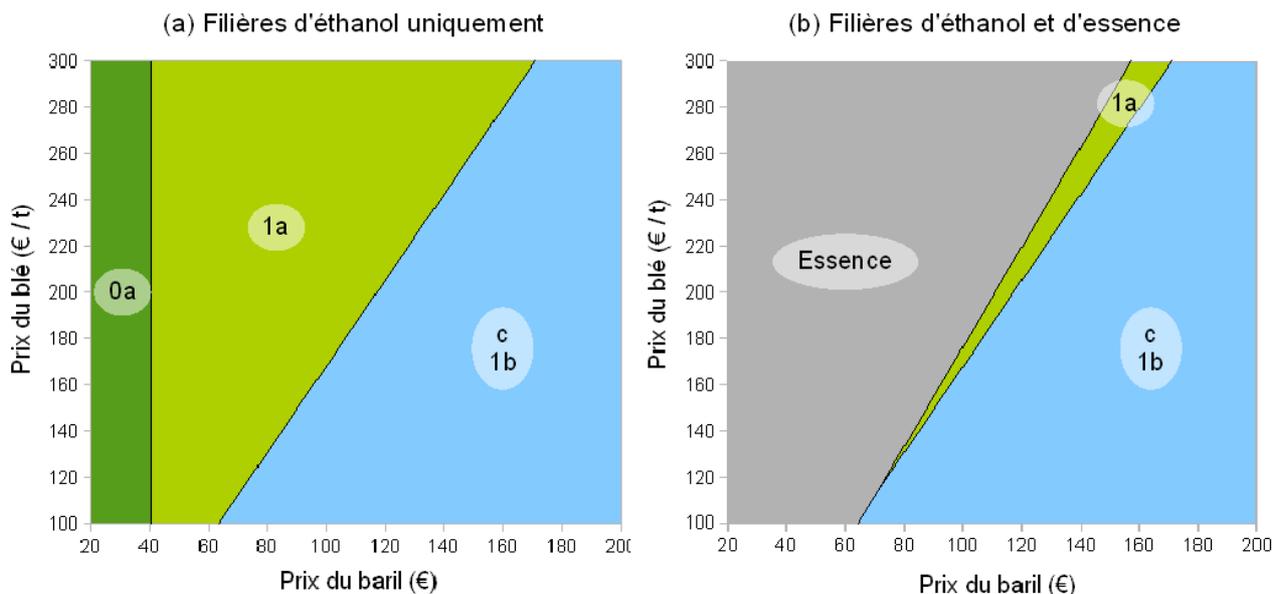


Figure III.24 - Cartographie de la compétitivité des filières d'éthanol issu de blé et d'essence en fonction du prix du baril et du prix du blé

Ainsi si la rentabilité de la variante (1a) de production d'éthanol par rapport à la variante (0a) de référence ne dépend que du prix du baril, il apparaît que la valorisation énergétique des co-produits est d'autant plus intéressante par rapport à leur valorisation en alimentation animale que les cours des produits agricoles sont bas. De plus il peut être remarqué que les gammes de prix du baril et du blé pour lesquelles le coût de production de l'éthanol est inférieur à celui de l'essence correspondent étroitement à la zone où les schémas permettant une valorisation énergétique des co-produits sont les plus rentables.

b) Production d'éthanol à partir de betterave

L'ensemble des variantes de production d'éthanol à partir de betterave a été étudié, à l'exception des schémas de type (2) dont les bilans d'ACV sont apparus moins intéressants que les modifications de type (1) (voir section IV.1.c). La dénomination (B) ou (H) des scénarios de type (a), c'est-à-dire valorisant les pulpes en alimentation animale, se réfère au caractère respectivement bas ou haut de l'hypothèse sur le prix du blé.

La figure III.25 présente l'évolution des coûts de production de l'essence et de l'éthanol de betterave, pour différentes variantes, selon le prix du baril et pour un prix de la betterave fixé à 40 €/t. Par souci de lisibilité une seule variante (H) et une seule variante (3) ont été représentées. En effet, les variantes (H) peuvent

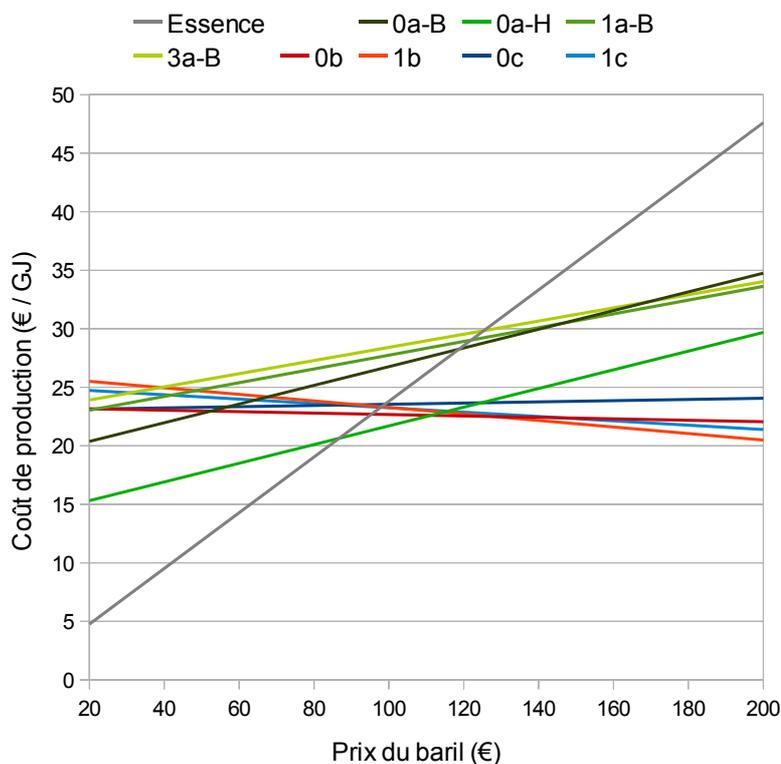


Figure III.25 - Évolution des coûts de production de l'éthanol de betterave en fonction du prix du baril et pour un prix de la betterave fixé à 40€/t

se déduire des variantes (*B*) par une translation inférieure des coûts d'un peu plus de 5 €/GJ, et les variantes (*3*) présentent un intérêt économique plus faible que leurs équivalents (*0*) ou (*1*).

Selon le schéma des filières, la production d'éthanol à partir de betterave devient compétitive avec l'essence à partir de prix du baril compris entre 85 et 125 €, le prix le plus bas correspondant à une valorisation des pulpes en alimentation animale dans un cas de cours élevé du blé (variante *0a-H*). Le prix du blé influe fortement sur l'intérêt économique de la valorisation énergétique des co-produits ; en effet si les coûts de production des scénarios de type (*b*) deviennent moindres que ceux de type (*a*) à partir d'un prix du baril de l'ordre de 50 € lorsque le prix du blé est à 100 €/t, ce seuil se situe à 110 € lorsque le blé se vend à 250 €/t.

Au-delà de telles valeurs du baril, la valorisation des pulpes et des vinasses par combustion devient l'option la plus intéressante sur le plan économique, d'abord selon un schéma de procédé de type (*0*) puis de type (*1*) à partir d'un prix du baril de l'ordre de 130 €. Ainsi l'intérêt des variantes technologiques par rapport au schéma de référence n'apparaît réellement qu'à des valeurs élevées du prix du baril.

La figure III.14 présente la cartographie des carburants les plus compétitifs en fonction des prix du baril et de la betterave pour les filières d'éthanol uniquement (figure III.14a) et pour les filières d'éthanol et d'essence (voir figure III.14b). La compétitivité des schémas de production d'éthanol entre eux ne dépend que des prix du baril et du blé. Comme vu précédemment la combustion des co-produits devient pertinente d'un point de vue économique à partir d'un prix du baril compris entre 50 et 110 €, en fonction du prix du blé, et la mise en place de technologies à base de CMV à partir d'un prix du baril de 130 €.

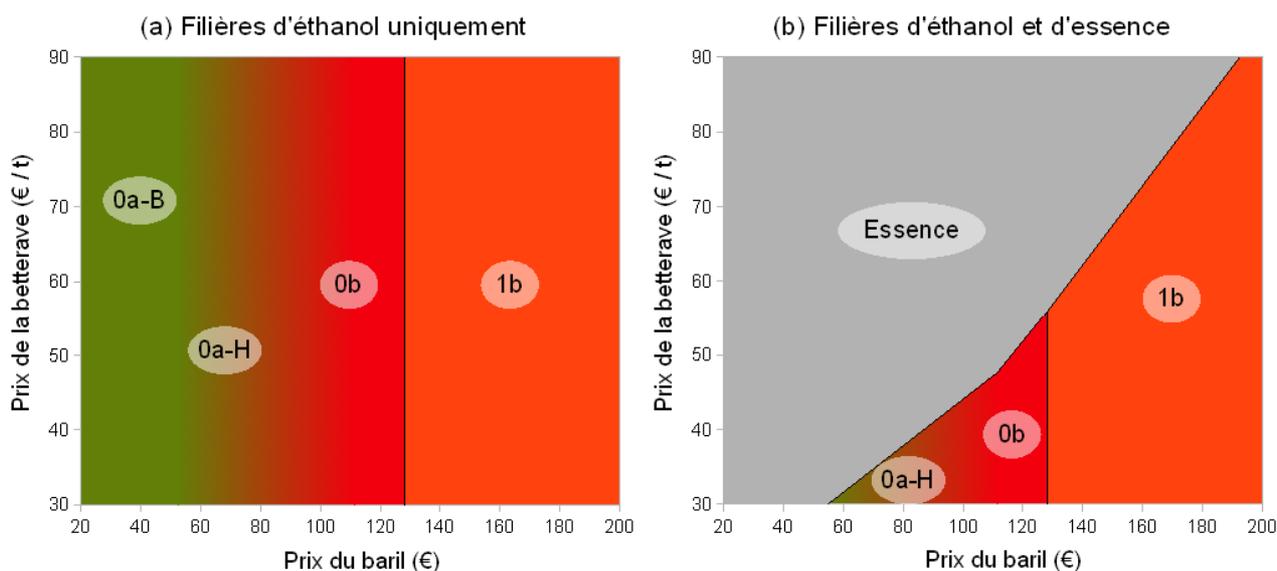


Figure III.26 - Cartographie de la compétitivité des filières d'éthanol issu de betterave et d'essence en fonction du prix du baril et du prix de la betterave

c) Production d'EMHV à partir de colza

L'ensemble des variantes de valorisation des co-produits de la production d'EMHV à partir de colza (*a*), (*b*), (*c*) et (*d*), définies à la section IV.4, a été pris en compte pour le calcul des coûts de production. Pour la variante (*a*), relative à la valorisation de la glycérine dans les industries de la chimie, deux hypothèses de cours de la glycérine ont été considérées et donc deux scénarios étudiés, dénommés (*a-H*) et (*a-B*) pour les hypothèses respectivement haute et basse à 300 et 125 €/t de glycérine (voir section V.1.c).

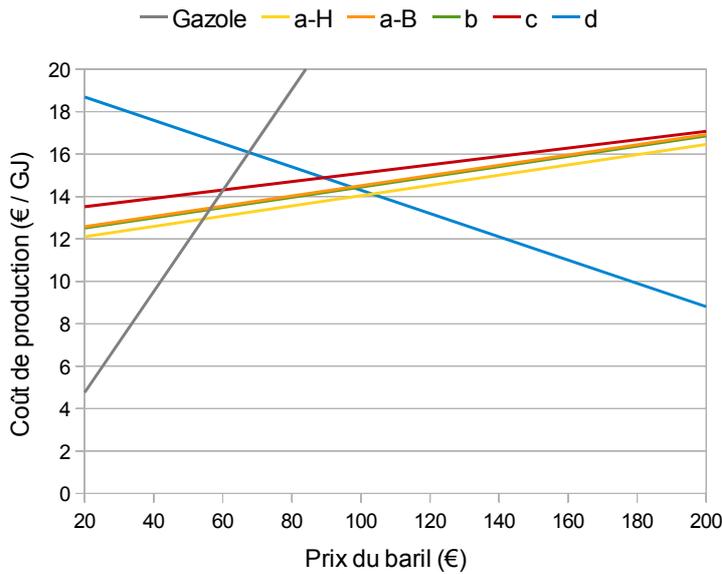


Figure III.27 - Évolution des coûts de production de l'EMHV de colza en fonction du prix du baril et pour un prix du colza fixé à 230 €/ t

La figure III.26 présente l'évolution des coûts de production du gazole et des différentes variantes d'EMHV de colza en fonction du prix du baril, pour un prix du colza fixé à 230 €/ t.

Selon ces résultats, la filière d'EMHV de colza devient compétitive avec le gazole à partir d'un prix du baril de l'ordre de 55 à 60 € pour les variantes valorisant les tourteaux en alimentation animale, et de l'ordre de 65-70 € pour la variante (d) de combustion des tourteaux et de la glycérine. Cette dernière variante devient ensuite plus intéressante que les autres schémas de production d'EMHV à partir d'un prix du baril de l'ordre de 90 à 100 €.

Bien qu'essentiellement due à la croissance de la production d'EMHV, la chute du cours de la glycérine aurait un impact relativement faible sur les coûts de production. Les résultats de la figure III.26 confirment également que l'hypothèse basse du cours de la glycérine, à 125 €/ t, correspond bien à une potentielle stabilisation du prix puisqu'alors les coûts de production sont très sensiblement les mêmes que dans le cas d'une valorisation de la glycérine en alimentation animale, marché beaucoup plus important et pouvant donc mieux absorber une production supplémentaire.

La figure III.27 présente la cartographie des variantes de carburant, gazole ou EMHV, les plus compétitives en fonction des prix du baril et du colza. Selon le cours du colza, le carburant le plus compétitif est le gazole en dessous d'un prix du baril de 40 à 80 €, et l'EMHV produit en utilisant les co-produits comme combustible au-delà de 70 à 145 €.

Entre ces deux zones, la valorisation de la glycérine la plus intéressante dépend de son prix de marché et des cours des matières premières agricoles. En dessous d'un prix du colza de l'ordre de 190-200 €/ t, la valorisation de la glycérine est plus intéressante en chimie, même si les cours sont bas. Au-delà de cette zone, le choix entre industries chimiques et alimentation animale est variable selon le contexte.

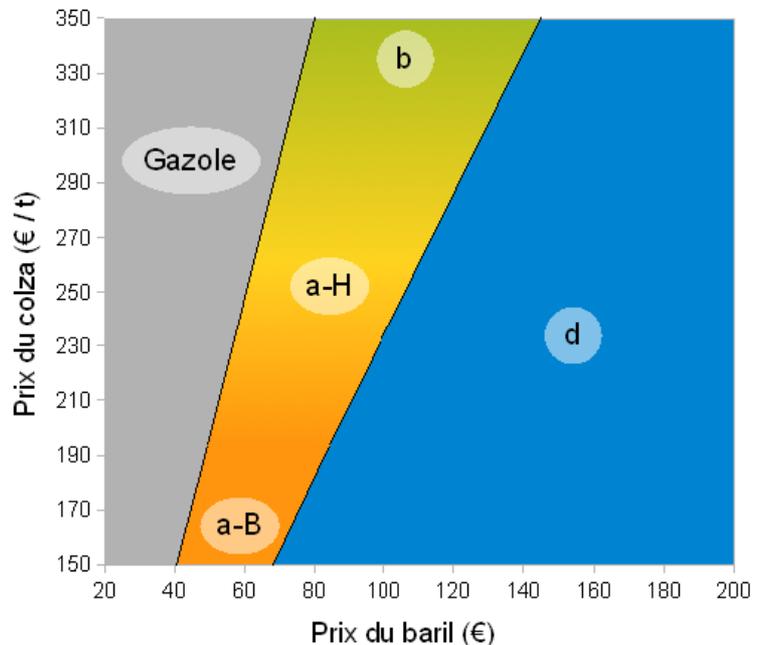


Figure III.28 - Cartographie de la compétitivité des filières d'EMHV issu de colza et de gazole en fonction du prix du baril et du prix du colza

Conclusion

Ce troisième chapitre s'est attaché à étudier de façon approfondie les procédés de première génération de production de carburants végétaux. Le recueil des éléments relatifs aux différentes étapes unitaires nécessaires et des données issues de la littérature a permis de construire un outil de simulation de ces transformations de biomasse, notamment de la betterave, du blé et de la canne à sucre en éthanol et, de façon plus simplifiée, du colza en EMHV.

Les enjeux liés à l'impact actuel de ces procédés ont ainsi pu être mieux compris que ce que le détail des bilans existants d'ACV étudiés par analyse de sensibilité au chapitre II avait permis. Ainsi il peut notamment être relevé que :

- les plantes sucrières que sont la betterave et la canne à sucre possèdent une très forte teneur en eau, respectivement de 75 et 70 %, ce qui induit une mauvaise conservation de la biomasse récoltée à l'état brut. Pour la betterave, dont la période de récolte dure approximativement 3 mois, un fonctionnement annuel est assuré afin de mieux rentabiliser les équipements en épurant et concentrant le sucre en un sirop qui peut alors être stocké ou utilisé en sucrerie. La période de récolte plus longue pour la canne à sucre, jusqu'à 6 mois, permet de s'affranchir de ces étapes très coûteuses en énergie.
- le traitement nécessaire, évoqué ci-dessus, du jus sucré issu de la diffusion des betteraves pour sa conservation sous forme de sirop souffre de plusieurs défauts dans sa prise en compte dans les études d'ACV analysées au chapitre II. En effet les études considérant une production intégrée de sucre et d'éthanol supposent que cette multi-fonctionnalité constitue un cas d'affectation et affectent entièrement cette phase d'épuration à la production de sucre, alors même que sa cristallisation produit un égout pauvre utilisé en fermentation, et les études ne prenant pas en compte d'activité de sucrerie présentent un traitement très limité du jus sans le justifier clairement.

Cette étude, en considérant une production d'éthanol non intégrée à une sucrerie mais avec un traitement du jus de même qualité que s'il devait être cristallisé, se place possiblement dans le cas le plus défavorable, sans effet toutefois sur la comparaison des scénarios. Afin de disposer des résultats réellement représentatifs de la filière actuelle de production d'éthanol à partir de betterave, une étude complémentaire doit être menée en considérant une production combinée d'éthanol et de sucre via une méthodologie pertinente de traitement de telles multi-fonctionnalités (voir chapitre I).

L'étude des variantes de valorisation des co-produits a montré que ce paramètre était des plus déterminants pour la performance, du point de vue des bilans énergie / GES, des procédés. Toutes filières confondues la valorisation énergétique des co-produits s'est révélée comme la voie la plus intéressante, permettant d'atteindre des bilans d'ACV très réduits.

Ceci explique les très bonnes performances du procédé de production d'éthanol à partir de canne à sucre. En effet la nature très fibreuse des tiges de canne fait que le résidu issu de l'extraction du sucre est très concentré en matières sèches, à des niveaux permettant une valorisation par combustion sans traitement préalable, et que son intérêt dans des applications autres que la combustion est très limitée.

Pour les autres filières, la méthanisation et la combustion des co-produits ont généralement présenté, tant du point de vue de la réduction des consommations d'énergie et des émissions de GES que sur le plan économique, des potentiels relativement similaires dans les différents cas d'étude. Les résultats semblent indiquer un intérêt un peu plus marqué de la méthanisation dans le cas de la production d'éthanol à partir de blé, et de la combustion dans celui d'éthanol à partir de betterave et

d'EMHV à partir de colza, mais ces tendances sont à confirmer par une analyse technico-économique plus précise.

L'analyse des variantes technologiques a révélé un intérêt moindre que celui lié à la valorisation des co-produits. Les options potentiellement les plus intéressantes parmi celles étudiées sont l'introduction d'une compression mécanique des vapeurs sur les étapes d'évaporation du sirop et de séchage des pulpes pour le procédé à partir de betterave, et d'un séchage par vapeur d'eau surchauffée des drêches pour celui à partir de blé. Les gains attendus sont légèrement plus marqués pour le blé que pour la betterave, avec une diminution de l'énergie consommée de 0,24 MJ / MJ et des émissions de GES de 12 gCO_{2-éq} / MJ, pour le blé, contre, respectivement, 0,06 à 0,16 MJ / MJ et 4 à 8 gCO_{2-éq} / MJ pour la betterave, selon la voie de valorisation des co-produits.

Cet écart se retrouve également sur le plan économique puisque l'amélioration du procédé d'éthanol à partir de blé par rapport au schéma de référence est intéressante à partir d'un prix du baril de l'ordre de 40 €, tandis que ce niveau est décalé à 130 € dans le cas de la betterave.

Les procédés de première génération possèdent donc des marges potentielles importantes de réduction des consommations énergétiques et des émissions de GES. La faisabilité technique de ces voies d'économies, identifiées par le présent travail, mériterait alors une étude plus précise. Cependant l'intérêt économique des schémas de production permettant les gains les plus importants, c'est-à-dire touchant à l'usage des co-produits, n'apparaît que dans des contextes où le prix du baril est élevé mais celui des matières premières végétales modéré.

La phase de transformation ne constitue toutefois qu'une des deux étapes principales des bilans d'ACV des carburants végétaux. Le chapitre IV suivant présentera donc notamment les enjeux liés à la mobilisation de la ressource et à l'usage des sols, et montrera que l'optimisation des résultats d'ACV du point de vue des impacts par MJ de carburant n'est pas neutre pour l'efficacité d'usage des sols et pour la performance globale des filières.

