
Description et première analyse des filières de carburants végétaux de 1^{ère} génération

On aime la nature et les hydrocarbures
Alain Souchon, *Sans queue ni tête*, 1993

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| I. Les carburants végétaux au sein de la biomasse énergie..... | 61 |
| I.1. La biomasse..... | 61 |
| I.2. La photosynthèse..... | 61 |
| a) Phase photochimique de la photosynthèse, ou phase claire..... | 62 |
| b) Phase biochimique de la photosynthèse, ou phase sombre..... | 62 |
| c) Efficacité photosynthétique..... | 64 |
| I.3. Valorisation de la biomasse..... | 65 |
| a) Principales voies de valorisation..... | 65 |
| b) Les filières de la biomasse énergie..... | 66 |
| c) Limites et atouts de la biomasse énergie..... | 67 |
| I.4. Les filières de carburants liquides..... | 68 |
| I.5. Principaux acteurs des filières de carburants végétaux..... | 69 |
| II. Analyse de Cycle de Vie des filières de 1ère génération..... | 71 |
| II.1. État des lieux..... | 71 |
| a) Filières et études considérées..... | 71 |
| b) Résultats d'ACV des références pétrolières : essence et gazole..... | 72 |
| c) Résultats d'ACV des carburants végétaux..... | 73 |
| II.2. Socle commun d'hypothèses des études..... | 75 |
| II.3. Méthodologie d'analyse..... | 77 |
| a) Collecte des données..... | 77 |
| b) Performances environnementales des filières considérées..... | 77 |
| II.4. Résultats d'ACV médians des carburants végétaux..... | 78 |
| a) Consommations énergétiques..... | 79 |
| b) Émissions de gaz à effet de serre..... | 80 |
| III. Origines des disparités des ACV des carburants végétaux..... | 82 |
| III.1. Méthodologie d'analyse..... | 82 |
| III.2. Influence des paramètres d'ACV sur les résultats finaux..... | 83 |
| III.3. Déterminants d'une application adéquate de l'ACV aux carburants végétaux..... | 84 |
| a) Méthodologie de l'ACV..... | 84 |
| b) Qualité des données..... | 86 |
| III.4. Utilisation pertinente de la bibliographie..... | 87 |
| Conclusion..... | 89 |

Index des figures

| | |
|--|----|
| Figure II.1 - Principales filières de la biomasse énergie..... | 66 |
| Figure II.2 - Carte simplifiée des principaux acteurs et producteurs mondiaux d'éthanol et d'EMHV | 69 |
| Figure II.3 - Consommations d'énergie primaire et émissions de gaz à effet de serre des filières essence et gazole, reportées selon différentes études..... | 73 |
| Figure II.4 - Résultats bruts d'ACV de consommations d'énergie fossile des carburants végétaux. . | 74 |
| Figure II.5 - Résultats bruts d'ACV d'émissions de gaz à effet de serre des carburants végétaux..... | 75 |
| Figure II.6 - Système d'étude général d'un cycle de vie de carburant végétal..... | 75 |
| Figure II.7 - Construction schématique d'un résultat d'Analyse de Cycle de Vie à partir des données de base..... | 77 |
| Figure II.8 - Consommations d'énergie des filières considérées..... | 79 |
| Figure II.9 - Émissions de gaz à effet de serre des filières considérées..... | 80 |
| Figure II.10 - Influence de l'ensemble des paramètres d'ACV sur le résultat final..... | 83 |
| Figure II.11 - Influence des données de culture sur le résultat final..... | 84 |
| Figure II.12 - Démarche minimale d'exploitation de la bibliographie en vue de répondre à une problématique de cycle de vie des carburants végétaux..... | 88 |

Index des tables

| | |
|--|----|
| Tableau II.1 - Principales caractéristiques photosynthétiques selon le type de métabolisme [66].... | 64 |
| Tableau II.2 - Caractéristiques de base des études considérées..... | 72 |
| Tableau II.3 - Résultats d'ACV des carburants végétaux, après affectation aux co-produits..... | 78 |
| Tableau II.4 - Gammes de productivité par hectare en carburants, issues des études considérées.... | 80 |
| Tableau II.5 - Répartition des données culturelles de base selon les trois catégories de données..... | 83 |
| Tableau II.6 - Crédit d'affectation associé à la glycérine des filières EMHV selon sa voie de valorisation..... | 85 |

Après avoir exposé les principes et la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) au premier chapitre, ce deuxième chapitre traite de son application aux voies de transformation de la biomasse en carburants liquides.

Tout d'abord la section I décrit les constituants et les enjeux relatifs à la biomasse et aux carburants végétaux. La section II analyse ensuite les études d'ACV existantes sur le sujet et met notamment en valeur les fortes disparités de résultats. Enfin la section III s'attache à déterminer les causes de cette importante variabilité des résultats et à proposer des recommandations de réalisation d'ACV en vue d'obtenir des valeurs plus pertinentes et précises.

I. Les carburants végétaux au sein de la biomasse énergie

La biomasse énergie se classe parmi les énergies dites renouvelables, ou ENR, au même titre que l'énergie hydraulique, solaire ou éolienne. Cependant certaines de ses spécificités en font une ENR un peu à part des autres. L'objectif de la première section de ce chapitre est ainsi de donner les éléments caractéristiques de la biomasse et, plus particulièrement, des carburants végétaux liquides, afin d'exposer les enjeux de leur utilisation.

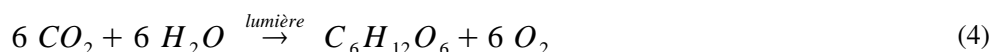
I.1. La biomasse

La directive européenne 2001/77/CE du 27 septembre 2001 définit la biomasse comme « *la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et de ses industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux* » [64]. Cette définition a depuis peu évolué ; en effet, la directive 2009/28/CE du 23 avril 2009 ne diffère que sur deux points : la précision que les produits, déchets et résidus sont d'origine biologique, et l'ajout des secteurs de la pêche et de l'aquaculture [65].

A ce titre la biomasse est intimement liée, directement ou à travers la chaîne trophique, à l'**activité photosynthétique**. La section I.2 exposera donc les grands mécanismes régissant la photosynthèse avant d'aborder aux sections I.3 et I.4 les aspects de valorisation de la biomasse produite.

I.2. La photosynthèse

La photosynthèse est un processus de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique. Elle permet ainsi à certaines plantes, algues et bactéries de produire leur propre matière organique à partir de dioxyde de carbone CO_2 et d'eau H_2O . D'une façon globale, l'ensemble des réactions impliquées dans ce processus est souvent schématisé par la réaction générale (4) suivante, relative à la production de glucose [66] :



En réalité cependant cette réaction (4) couvre deux phases distinctes de réactions : une *phase photochimique*, dite "phase claire", de capture de l'énergie solaire, et une *phase biochimique*, dite "phase sombre", de synthèse de composés organiques.

Remarque : au-delà de la production de matière organique, un des intérêts importants de la photosynthèse est bien évidemment la régénération de dioxygène O_2 , assurant le maintien de sa concentration dans l'atmosphère et permettant ainsi la respiration de l'ensemble des êtres vivants. Cependant ce point n'étant pas un enjeu direct de l'utilisation de la biomasse énergie, il ne sera pas étudié plus avant ici.

a) Phase photochimique de la photosynthèse, ou phase claire

Les premières molécules impliquées dans le processus de photosynthèse sont les *pigments*. Les pigments photosynthétiques appartiennent à trois grandes familles : les *chlorophylles*, connues pour leur couleur verte et présentes chez tous les organismes photosynthétiques, les *caroténoïdes*, également très répandus, et les *phycobilines*, propres aux algues rouges et bleues, ces dernières étant également appelées cyanobactéries.

L'ensemble de ces pigments permet de valoriser une grande partie du spectre visible de la lumière, soit les longueurs d'onde de 400 à 700 nm si on exclut les bactéries (ou de 350 à 750 nm en incluant celles-ci). Cette gamme représente approximativement 50 % de l'énergie du rayonnement solaire global disponible au niveau du sol [66, 67].

De façon simplifiée, l'absorption de photons par ces pigments photosynthétiques induit une réaction d'oxydo-réduction impliquant un échange d'électrons entre les couples O_2 / H_2O et $NADPH / (NADPH + H^+)^{11}$. Ainsi, le composé réducteur $NADPH + H^+$ est régénéré tandis que de l'oxygène O_2 est formé [66].

Ces deux réactions de réduction et d'oxydation se réalisent de part et d'autre d'une membrane : le *thylakoïde*, à travers lequel se réalise un mouvement de protons H^+ . Le potentiel électrochimique ainsi créé implique une réaction dite de photophosphorylation, à l'origine d'un mouvement inverse de protons H^+ à travers la membrane et tendant donc à annuler le gradient de pH. Cette réaction régénère, à partir d' ADP^{12} et d'un phosphate inorganique, une molécule d' ATP^{13} , élément de base de la fourniture d'énergie du vivant [66].

Ainsi, la phase claire de la photosynthèse permet la conversion de l'énergie solaire en énergie chimique, sous forme d' ATP et du pouvoir réducteur de $NADPH + H^+$. Ces deux composés interviennent par la suite au cours de la phase sombre.

b) Phase biochimique de la photosynthèse, ou phase sombre

La phase biochimique de la photosynthèse réalise la synthèse de matière organique à partir des produits de la phase claire d'une part, et de dioxyde de carbone CO_2 d'autre part. Différents métabolismes permettent cette production. Le plus répandu est dit de *type C3* : il concerne la majorité des espèces vivantes capables de photosynthèse. Les métabolismes de *type C4* ou *CAM* constituent en quelque sorte une évolution du type C3.

Remarque : la dénomination de "phase sombre" signifie, en opposition à la phase claire, que sa réalisation est indépendante de la présence de lumière ; cela ne doit donc pas être interprété comme un besoin d'obscurité.

Métabolisme des espèces de type C3

L'enzyme essentielle de la phase biochimique de la photosynthèse est la *RubisCO*¹⁴, car elle initie l'ensemble complexe de réactions qui va permettre *in fine* l'intégration du dioxyde de carbone CO_2 à la matière organique ; cet ensemble de réactions enzymatiques est appelé *cycle de Calvin* [66, 67, 68].

De façon simplifiée, la RubisCO fixe la molécule de CO_2 sur un pentose pour produire un intermédiaire réactionnel qui se stabilise en deux acides à trois carbones. Puis, après deux étapes où interviennent successivement une molécule d' ATP et un composé $NADPH + H^+$, le groupement carboxyle $-COOH$ de l'acide produit devient groupement carbonyle $-CHO$ d'un aldéhyde.

Cet aldéhyde à trois carbones est considéré comme la molécule marquant réellement l'incorporation du CO_2 initial au monde organique, ce que traduit la dénomination "C3" de ce type de métabolisme. Cette molécule peut ensuite être sollicitée pour la synthèse d'autres composés organiques tels que des sucres, ou pour la régénération des pentoses nécessaires à la fixation de nouvelles molécules de CO_2 par la RubisCO.

11 NADP désigne une enzyme dont le nom complet est le Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate.

12 ADP : Adénosine DiPhosphate

13 ATP : Adénosine TriPhosphate

14 RubisCO désigne une enzyme dont le nom complet est la Ribulose 1,5-diphosphate Carboxylase / Oxygénase

Le cycle de Calvin correspond ainsi au rôle carboxylase de la RubisCO. Cependant celle-ci peut également jouer le rôle d'oxygénase. Dans ce cas, la RubisCO fixe une molécule d'oxygène O₂ à un pentose ce qui, après différentes réactions, induit l'émission d'une molécule de CO₂. Ce phénomène, à l'effet inverse de celui de la photosynthèse, est appelé *photorespiration* [66, 67].

L'*assimilation nette*, représentative de la quantité de dioxyde de carbone CO₂ qu'une plante est capable d'absorber par unité de temps, est la différence entre la photosynthèse brute, correspondant au CO₂ effectivement absorbé, et les phénomènes de respiration et de photorespiration. Cependant, si la respiration est indispensable à la vie, la photorespiration se présente comme un phénomène parasite de la photosynthèse, à l'intérêt encore mal compris, qui peut, selon les conditions, représenter une perte de carbone supérieure à celle due à la respiration et donc constituer un facteur important de réduction de l'assimilation nette [66, 67].

Métabolisme des espèces de type C4

Certaines plantes tropicales, telles que la canne à sucre, le maïs ou le sorgho, ont développé un métabolisme différent, dit de type C4. Dans ce cas, l'enzyme intervenant dans la fixation du CO₂ atmosphérique n'est plus la RubisCO mais la PEP carboxylase¹⁵, qui associe ce CO₂ à un acide à trois carbones, ce qui va conduire à la production d'acides malique ou aspartique, à quatre carbones [66, 67]. La dénomination "C4" de ce métabolisme est due à ces molécules.

Ces acides à quatre carbones sont ensuite transportés vers des sites disposant de l'équipement enzymatique du cycle de Calvin. Les acides sont alors dissociés en un acide à trois carbones, qui va permettre de régénérer l'acide précédemment consommé, et une molécule de CO₂, qui va alors intégrer un cycle de Calvin identique à celui du type C3 [66, 67, 68].

L'étape supplémentaire de la phase biochimique du type C4, due à la PEP carboxylase, induit une demande énergétique, sous forme d'ATP, supérieure à celle du type C3 [66]. Cependant l'intérêt majeur de cette opération est de limiter fortement le phénomène de photorespiration. En effet, d'une part la PEP carboxylase n'a pas d'activité oxygénase, et d'autre part le milieu où agit la RubisCO du cycle de Calvin est enrichi en CO₂.

Ce mécanisme photosynthétique est bien adapté aux conditions tropicales puisque l'énergie solaire y est plus abondante et l'accès au CO₂ plus limité. En effet l'échange de CO₂ entre l'atmosphère et la plante est permis par de petits orifices appelés *stomates*, qui sont également responsables des échanges d'oxygène et de vapeur d'eau. Ainsi lorsque la température est plus élevée, les stomates ont tendance à se fermer pour limiter les pertes en eau ; ceci limite alors d'autant l'absorption de CO₂.

Métabolisme des espèces de type CAM

Le métabolisme de type CAM¹⁶ est une variante du type C4, adaptée à des conditions désertiques ou semi-désertiques. Les représentants les plus connus de ce type de métabolisme sont les cactus ou l'ananas.

Le schéma de photosynthèse est le même que celui du type C4. La différence essentielle tient au fait que la fixation du CO₂ atmosphérique et la synthèse de matière organique ne sont pas séparées dans l'espace comme dans le cas C4 mais dans le temps [66, 68]. En effet, compte tenu des conditions climatiques dans lesquelles poussent les plantes de type CAM, leurs stomates sont complètement fermés dans la journée. Le CO₂ est alors absorbé par la plante pendant la nuit et stocké sous forme d'acides à quatre carbones par la PEP carboxylase. Ce stock alimente ensuite pendant la journée le cycle de Calvin.

15 PEP carboxylase signifie PhosphoÉnolPyruvate carboxylase

16 CAM : Crassulacean Acid Metabolism

Éléments de comparaison des trois types de métabolisme

Le tableau II.1 présente quelques caractéristiques photosynthétiques des trois types de métabolisme décrits ci-dessus. La meilleure valorisation du CO₂ due à la moindre photorespiration du type C4 par rapport au type C3 se voit à son point de compensation CO₂ plus faible. A plus hautes teneurs en CO₂ cet effet se traduit par le fait qu'à partir d'une concentration d'environ 200 ppm, sous un éclairage de 200 W / m², le CO₂ n'est plus un paramètre limitant du métabolisme en C4, alors que ce phénomène de saturation n'apparaît qu'aux alentours de 1200 ppm pour le type C3 [66, 1].

Tableau II.1 - Principales caractéristiques photosynthétiques selon le type de métabolisme [66]

| | C3 | C4 | CAM |
|--|---------|---------|--------|
| Température optimale de photosynthèse (°C) | 15 - 25 | 30 - 47 | ~ 35 |
| Point de compensation CO ₂ ¹⁷ (ppm) | 30 - 70 | 0 - 10 | N/A |
| Assimilation nette (mgCO ₂ /(dm ² .h)) sous conditions : 300 ppm CO ₂ , 21 % O ₂ , 25 °C et lumière saturante | 10 - 30 | 50 - 70 | 1 - 10 |

Finalement les résultats d'assimilation nette montrent que la production de biomasse est potentiellement plus importante pour les espèces de type C4 que pour celles de type C3, d'environ un facteur 3. Concernant le type CAM, les niveaux d'assimilation nette relevés, très faibles, traduisent l'adaptation dont ces espèces ont dû faire preuve vis-à-vis de conditions extrêmement défavorables.

c) Efficacité photosynthétique

D'un point de vue énergétique le rendement de la photosynthèse peut être calculé à partir de celui de ses différentes étapes vues aux deux sections a et b précédentes [66]. Le rendement est déjà limité à 50 % par la gamme de sensibilité spectrale des pigments (voir section a). Lors de la phase claire, le rendement global du thylakoïde, obtenu en rapportant l'énergie nécessaire à la régénération des éléments ATP et NADPH + H⁺ à celle apportée par l'absorption des photons, est de l'ordre de 24 à 34 %.

En ce qui concerne la phase sombre, le rendement du cycle de Calvin, en considérant la synthèse d'une molécule de glucose, est de 90 %, valeur qui diminue à 81 % pour les métabolismes de type C4, dû à l'étape supplémentaire de concentration du CO₂. Toutefois l'effet de la photorespiration, important pour le type C3 mais qui pourra être négligé pour le type C4, peut réduire le rendement photosynthétique de 50 % [66].

L'efficacité théorique de la photosynthèse est alors environ de 5 à 12 % pour un métabolisme de type C3 (pour une chute de rendement due à la photorespiration comprise entre 25 et 50 %), et de 9 à 14 % pour un métabolisme de type C4. En pratique cependant ces valeurs de rendement sont rarement atteintes, et les maximums instantanés d'efficacité photosynthétique ne dépassent généralement pas, selon les cultures, 1 à 5 % [66, 67].

A l'échelle d'une année, les efficacités photosynthétiques constatées peuvent varier entre 0,5 et 1,4 %, voire 2,4 % pour des espèces en C4 [67], soit inférieures d'un facteur 2 aux maximums instantanés et d'un facteur 10 aux rendements théoriques. Cette importante différence est notamment due aux variations dans l'année des conditions de température et d'humidité, au cycle de croissance et au développement de la surface foliaire, à la teneur en CO₂ disponible, à l'albédo ou à la disponibilité en éléments minéraux [66].

Enfin, une partie du carbone fixé par la photosynthèse est consommé pour la respiration des plantes, qui fournit l'énergie nécessaire à la croissance et l'entretien du végétal. D'une façon globale il peut être considéré que la respiration utilise environ 50 % du carbone fixé, mais cette valeur peut

¹⁷ Le point de compensation CO₂ se définit comme la concentration atmosphérique de CO₂ pour laquelle l'assimilation nette est nulle.

varier de 30 à 40 % pour une plante herbacée annuelle sous climat tempéré à 60 à 70 % pour un arbre adulte sous climat tropical [1]

Note : pour les espèces végétales terrestres, la serre est un moyen de réduire l'écart entre efficacités photosynthétiques théorique et constatée dans le sens où les conditions de culture, notamment la température et la teneur en CO₂, peuvent être maîtrisées afin de maximiser la production de biomasse.

Ce principe est exploité un cran plus loin lors de l'utilisation de bioréacteurs pour la culture de microalgues, où sont combinés les avantages d'une maîtrise plus grande des conditions de culture et d'une structure végétale plus simple. Les efficacités photosynthétiques mesurées sur des essais prolongés peuvent alors atteindre 5 à 6 % [69].

I.3. Valorisation de la biomasse

a) Principales voies de valorisation

La première des utilisations de la biomasse est bien évidemment alimentaire. En 2003, l'alimentation humaine représentait, à l'échelle mondiale, une consommation finale moyenne de 2808 kcal / personne / jour, pour des moyennes nationales comprises entre 1519 (État d'Érythrée) et 3753 kcal / personne / jour (Etats-Unis), soit de 54 à 134 % de la moyenne mondiale [70]. Ceci équivaut, avec un équivalent énergétique de 4,2 J / cal et une population mondiale en 2003 de 6,3 milliards d'individus, à une consommation finale d'énergie d'un peu plus de 27 EJ¹⁸ / an. A titre de comparaison, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) chiffre pour la même année 2003 la consommation finale d'énergie issue de la biomasse et des déchets à 43 EJ, pour un total toutes usages confondus de 305 EJ [71]. L'alimentation humaine équivaut ainsi à environ 60 % des consommations finales de biomasse à des fins énergétiques au sens strict.

La consommation finale de calories alimentaires par l'homme n'est toutefois pas représentative des quantités de biomasse globalement utilisées à des fins alimentaires. Tout d'abord il existe des pertes à tous les niveaux de stockage, du silo jusque chez le particulier, qui sont difficiles à estimer mais qui pourraient représenter 10 à 15 % des volumes produits [72]. Ensuite une part de l'alimentation humaine, à hauteur de 17 % des calories consommées à l'échelle mondiale en 2003 [70], soit 477 kcal / personne / jour, mais qui peut atteindre 1340 kcal / personne / jour (Islande), est d'origine animale, et a donc nécessité l'ingestion d'une quantité plus importante de calories via la chaîne trophique. La bibliographie indique des valeurs telles que 4 calories d'origine végétale pour produire 1 calorie de porc, de volaille ou d'œuf, 8 pour 1 calorie de lait, ou encore 11 pour 1 calorie de bœuf ou de mouton [73]. Enfin l'homme n'est évidemment qu'une des espèces vivantes consommatrices de biomasse à des fins alimentaires.

Remarque : si l'homme peut considérer certaines quantités de biomasse comme perdues ou comme des déchets, c'est en réalité rarement le cas dans le sens où les quantités non valorisées par l'homme pourront très généralement profiter à d'autres organismes vivants.

Les valorisations de la biomasse non-alimentaire sont classiquement distinguées selon 3 grandes voies : la biomasse matériau, ou les *biomatériaux*, la biomasse molécule, ou les *biomolécules*, et la biomasse énergie, ou la *bioénergie*. Le terme de biomatériaux désigne les utilisations de la biomasse en tant que matière, et celui de biomolécules celles valorisant l'extraction d'une ou plusieurs molécules d'intérêt. Même si elles apparaîtront plus loin, notamment au chapitre III lors des discussions sur les valorisations des co-produits des carburants végétaux, ces voies ne seront pas détaillées plus avant ici. Enfin, la voie et les filières principales de la biomasse énergie sont décrites plus avant à la section b suivante.

Exemples de secteurs d'activité concernés par :

- les biomatériaux : le textile ou le bâtiment (bois de construction ou isolants nouveaux), et,
- les biomolécules : la pharmacie, les cosmétiques ou la chimie.

¹⁸ L'ExaJoule EJ correspond à 10¹⁸ J, soit un milliard de GJ.

b) Les filières de la biomasse énergie

La figure II.1 indique les principales filières de la biomasse énergie, reliant type de biomasse végétale utilisée et conditionnement du vecteur énergétique obtenu, c'est-à-dire solide, liquide ou gaz. Dans un souci de lisibilité toutefois, les filières ayant recours à une biomasse d'origine animale ou à des produits recyclés, telles que les graisses animales ou les huiles de friture usagées, ont été exclues de cette représentation. De même seuls les produits principaux d'intérêt de chacune des voies de conversion ont été représentés.

Exemple : le chapitre III montrera que chacune des filières de production de carburants végétaux de première génération, par extraction des lipides ou par fermentation des sucres, s'accompagne de co-produits qui peuvent être valorisés selon différentes voies : séchage afin de constituer un combustible solide, méthanisation, voire pyrolyse rapide ou hydrolyse enzymatique pour obtenir un carburant liquide.

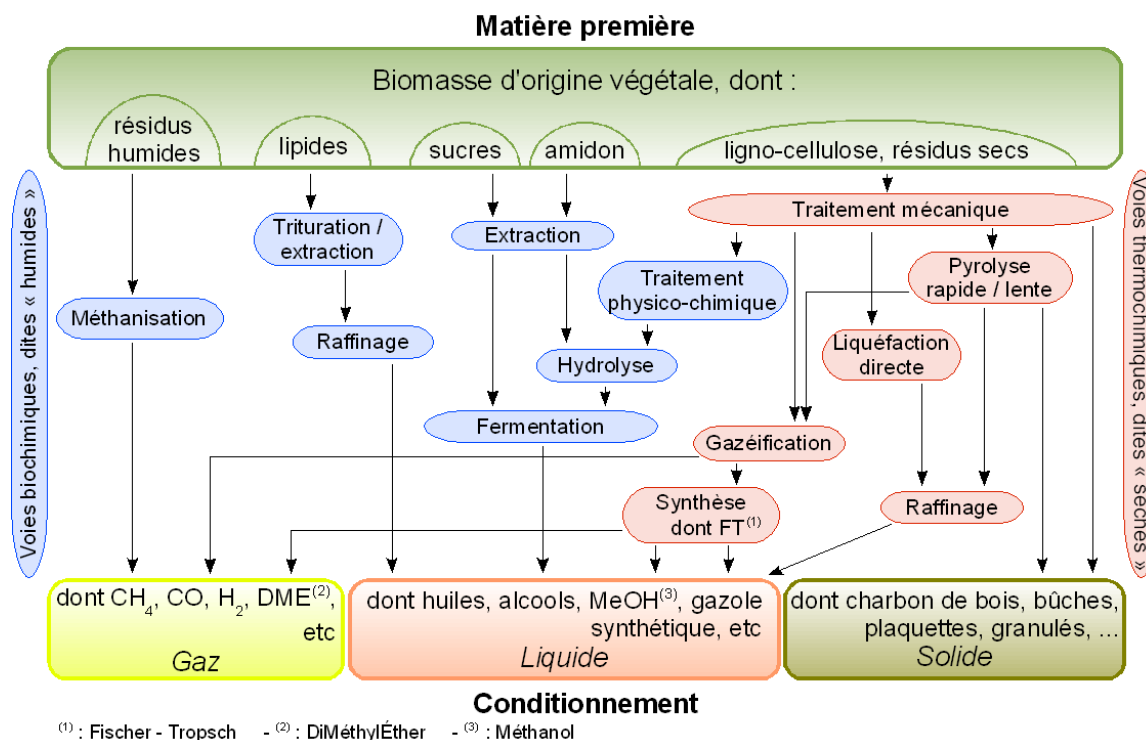


Figure II.1 - Principales filières de la biomasse énergie

Deux familles de procédés de conversion de la biomasse énergie sont couramment distinguées : d'une part les **voies thermochimiques**, dites également *sèches*, qui vont transformer la biomasse sous l'action de la chaleur, et d'autre part les **voies biochimiques**, dites également *humides*, qui vont faire appel à des processus de conversion biologiques.

Voies thermochimiques de conversion

Sans traitement préalable, la biomasse, dont notamment le bois, peut déjà se présenter comme un vecteur énergétique, sous forme de combustible solide. Ainsi depuis la découverte du feu il y a plus de 400 000 ans par l'*Homo erectus*, la biomasse brute, ou conditionnée sous forme de bûches ou de plaquettes, est utilisée en *combustion*, c'est-à-dire par une oxydation de la matière organique avec l'oxygène de l'air [68].

Un second mode d'obtention de combustible solide à partir de biomasse, c'est-à-dire qui ne se résume pas à des traitements mécaniques, consiste à transformer celle-ci en charbon de bois. C'est le rôle de la *pyrolyse* lente.

A l'inverse de la combustion, la pyrolyse est une dégradation thermique de la biomasse en absence d'oxygène O₂, de sorte que celle-ci ne subit pas d'oxydation. Si l'élévation de température se fait de façon lente, de quelques heures à quelques jours, pour atteindre une température finale de

l'ordre de 300 °C, le produit principal obtenu, de l'ordre de 35 % en masse de la matière sèche initiale, est le charbon de bois [74].

La pyrolyse produit également des vapeurs qui, si elles sont refroidies assez rapidement afin de limiter les réactions secondaires de dégradation, permettent d'obtenir une huile à température ambiante. Les conditions permettant de maximiser cette production est une température finale de l'ordre de 600 °C, atteinte à l'aide de vitesses de chauffe de l'ordre de quelques centaines à quelques milliers de degrés Celsius par seconde ; c'est pourquoi ce type de pyrolyse est dit rapide. L'huile obtenue peut alors être raffinée, ou utilisée en gazéification [74, 75].

La *gazéification*, comme son nom l'indique, favorise la production de gaz, essentiellement de dihydrogène H₂, de monoxyde et de dioxyde de carbone CO et CO₂, et de méthane CH₄. Ceci est rendu possible par un milieu en défaut d'oxygène O₂, à une température comprise généralement entre 800 et 1200 °C [74]. Le mélange de gaz alors obtenu peut être valorisé comme tel, ou servir de base à la synthèse d'autres composés gazeux, tels que le DiMéthylÉther (DME), ou liquides, tels que le méthanol ou des hydrocarbures synthétiques par le procédé Fischer-Tropsch [8].

Enfin, la *liquéfaction directe*, ou *conversion hydrothermale*, a pour principe, de manière caricaturale, de reproduire les conditions de formation du pétrole. Ainsi la biomasse est placée dans un solvant, aqueux ou organique, sous pression élevée, généralement entre 150 et 200 bar, à une température comprise entre 250 et 450 °C, et sous atmosphère réductrice, ce qui permet d'obtenir un liquide qui pourra généralement être valorisé après traitement.

Voies biochimiques de conversion

La digestion anaérobie de matière organique par des bactéries est une source de méthane CH₄. La *méthanisation* est la transposition de ce phénomène, qui a lieu naturellement dans la panse des ruminants, à un réacteur, appelé digesteur, en vue de valoriser le gaz produit.

Enfin, les huiles, obtenues par extraction des lipides produits par photosynthèse, et les alcools, issus de la *fermentation* alcoolique des sucres ou polymères de sucres présents dans la biomasse, constituent des vecteurs énergétiques liquides issus de la biomasse. La section I.4 exposera plus avant ces filières de conversion.

c) Limites et atouts de la biomasse énergie

Chacune des voies de valorisation de la biomasse vues à la section précédente et des étapes présentées sur la figure II.1 possède bien évidemment un rendement, lié au procédé de transformation en lui-même mais également à la fraction d'intérêt de la biomasse initiale, telle que la part de sucre d'une betterave pour la production d'éthanol par fermentation par exemple. Ainsi le rendement de la biomasse énergie, en tant que voie de valorisation de l'énergie solaire, s'entend comme un rendement global agrégeant rendement des filières et efficacité photosynthétique (voir section I.2.c).

Exemple : si les pertes énergétiques liées à la récolte et éventuellement le traitement de la biomasse pour une utilisation sous forme solide pourront être négligées (voir section b précédente), il n'en est pas de même pour la combustion en chaudière. En effet le rendement de combustion en chaudière peut varier de 10 à 15 %, pour des cheminées à foyer ouvert, à près de 90 % pour des chaudières à granulés [68].

Ainsi, en considérant une efficacité photosynthétique de 1 %, le rendement global de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique par combustion solide est compris entre 0,1 et 0,9 %.

La biomasse énergie, du fait de sa limitation liée à la photosynthèse, présentera donc des rendements de conversion de l'énergie solaire très généralement compris entre 0 et 1 %, voire, de façon marginale, de quelques pour-cents pour les systèmes tirant un meilleur profit de la photosynthèse (espèces en C4 associées à une voie de valorisation efficace et tirant parti de l'ensemble de la biomasse produite, ou technologies fondées sur une culture de microalgues par bioréacteur (voir section I.2.c)).

Par conséquent, l'efficacité de conversion de l'énergie solaire via la biomasse se situe un cran en-dessous de valorisations telles que le solaire thermique ou le photovoltaïque, présentant des

rendements, respectivement, de plusieurs dizaines de pour-cents [76] ou compris, grossièrement, entre 5 et 15 % [77]. Cette comparaison d'ordres de grandeur, certes limitée puisque ne tenant compte ni de la filière dans son ensemble, ni de l'application envisagée, montre cependant que l'intérêt de la biomasse énergie ne découle pas de son efficacité énergétique vis-à-vis du rayonnement solaire incident.

L'intérêt majeur de la biomasse tient alors essentiellement à la forme, chimique et donc matérialisée, en laquelle est convertie l'énergie solaire. A partir du CO₂ atmosphérique, la biomasse permet de disposer de chaînes moléculaires carbonées, qui constituent un vecteur énergétique qui peut être stocké et transporté, permettant une utilisation différée et/ou délocalisée.

Exemples d'utilisation :

- *différée* : le recours à l'énergie solaire pour le chauffage domestique peut souffrir du décalage temporel entre la source, plus performante l'été, et le besoin, plus grand l'hiver ; la biomasse permet ici de disposer de l'énergie accumulée l'été au moment voulu,
- *délocalisée* : les modes de transport routiers reposent aujourd'hui majoritairement sur l'utilisation de carburants liquides embarqués sur les véhicules ; à l'heure actuelle la biomasse est le moyen le plus simple de disposer de tels vecteurs à partir d'énergie solaire et non de réserves fossiles.

I.4. Les filières de carburants liquides

La section I.3.b a présenté succinctement les voies de production de carburants liquides à partir de biomasse. Ces voies sont classiquement distinguées en trois générations, selon la matière première utilisée :

- la *première génération*, qui utilise la partie alimentaire des cultures, soit le sucre, l'amidon et les lipides,
- la *deuxième génération*, qui valorise les éléments structuraux des végétaux, soit la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, et
- la *troisième génération*, qui vise à exploiter le potentiel des microalgues à produire de la biomasse et, plus particulièrement, des lipides.

La première génération de ces carburants bénéficie donc des connaissances acquises au sein des Industries Agro-Alimentaires (IAA), tandis que les deuxième et troisième générations se positionnent sur des concepts plus récents et innovants. Ainsi, s'il existe aujourd'hui des pilotes de plus en plus nombreux de procédés de deuxième génération [78], seule la première génération est produite à l'échelle industrielle. Le détail de ces procédés de première génération sera donné plus précisément au chapitre III.

Les filières se classent ensuite en fonction du carburant pétrolier, essence ou gazole, auquel peut se substituer leur produit. La première génération de carburants végétaux permet d'obtenir les composés suivants :

- l'**éthanol**, qui, de par ses caractéristiques, est un substitut de l'*essence*. Il est obtenu par fermentation des sucres disponibles dans les végétaux, soit directement (canne à sucre, betterave, etc), soit après hydrolyse de l'amidon, un polymère de sucre (céréales telles que maïs ou blé, pomme de terre, etc).

Note : la voie biochimique de production d'éthanol de deuxième génération suit la même logique que la première, dans le sens où l'objectif est d'accéder aux sucres constitutifs des polymères de la ligno-cellulose afin de les fermenter. Schématiquement, les principales différences, et donc difficultés, viennent du fait que :

- *d'un point de vue de la structure chimique, les polymères sont moins accessibles aux enzymes, ce qui rend nécessaire d'effectuer des pré-traitements plus importants que pour la première génération (voir figure II.1),*
- *là où la fonction biologique de l'amidon est d'être un polymère de réserve, le rôle des polymères ligno-cellulosiques est de donner une structure aux végétaux, ce qui implique que ses hydrolases naturelles, que l'on peut trouver chez les termites par exemple, sont moins nombreuses et moins bien connues que pour l'amidon, et*

- les sucres constitutifs de la ligno-cellulose, à cinq ou six carbones, ne sont pas les mêmes que ceux disponibles directement dans les plantes, tels que le glucose ou le saccharose, ce qui, de la même façon que pour les hydrolases, limite les connaissances en termes de levures capables de fermenter ces sucres.
- l'**huile végétale**, dont les acides gras l'approche plus d'un *fioul* ou d'un *gazole*. Cette huile est extraite directement des graines (colza, tournesol, soja, etc), par trituration, ou des fruits (palmier à huile, olivier, etc) de plantes oléagineuses. Son utilisation est alors possible après quelques traitements et purifications.

L'éthanol et l'huile végétale peuvent tous deux servir de base, à l'aide de produits pétroliers, à la production d'additifs de carburants, dont les principaux sont l'ÉthylTertioButylÉther (ETBE) et les Esters Méthyliques d'Huiles Végétales (EMHV). L'*ETBE* est obtenu par éthérisation de l'isobutène par l'éthanol ; d'un point de vue massique, 0,45 kg d'éthanol et 0,55 kg d'isobutène vont permettre la synthèse de 1 kg d'*ETBE*. Les *EMHV* sont issus de la trans-estérification des triglycérides présents dans l'huile végétale avec un alcool, ici le méthanol ; le bilan massique n'est pas fixé par la stœchiométrie de la réaction puisque la longueur des chaînes carbonées est variable, mais il peut être considéré que l'ajout de 0,1 kg de méthanol à 1 kg d'huile végétale va permettre la production de 1 kg d'*EMHV* et de 0,1 kg de glycérine.

Du point de vue des formulations de carburants, l'éthanol est plus généralement produit déshydraté et utilisé directement en mélange avec l'essence, de quelques pour-cents à 85 %. L'utilisation d'huile végétale pure reste relativement limitée en raison des difficultés que cela peut occasionner au niveau des motorisations, et c'est donc sous forme d'*EMHV* qu'elle est utilisée, généralement en mélange et jusqu'à une hauteur de 30 %, sur flottes captives, même si une utilisation pure d'*EMHV* a déjà été testée [8].

I.5. Principaux acteurs des filières de carburants végétaux

La figure II.2 présente une carte mondiale des principaux producteurs mondiaux d'éthanol et d'*EMHV*. Les données sont relatives aux volumes de production de l'année 2007, en Mtep¹⁹ [79].

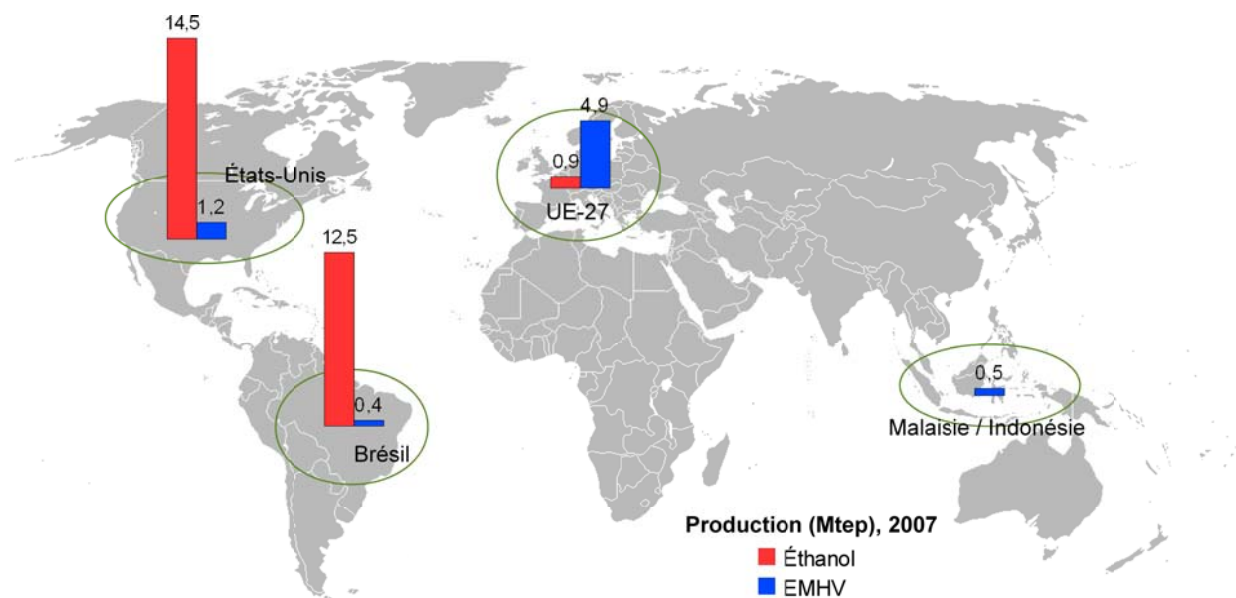


Figure II.2 - Carte simplifiée des principaux acteurs et producteurs mondiaux d'éthanol et d'*EMHV*

Éthanol et huile végétale sont présents sur le marché des carburants dès les premières motorisations, mais en disparaissent au cours des années 1960 compte tenu de l'offre importante en produits pétroliers [8]. Si le Brésil, les États-Unis et certains pays européens mettent en place des programmes visant à promouvoir ces carburants végétaux à la suite des chocs pétroliers des années 1970, le soutien faiblit avec la baisse des prix du pétrole. Seule la politique du Brésil, avec son

19 La Tonne Équivalent-Pétrole TEP est une unité d'énergie représentant le contenu énergétique d'une tonne de pétrole, soit 42,6 GJ [42].

programme *Proalcool* valorisant l'éthanol produit à partir de canne à sucre, n'a pas ou que modérément faibli. Ceci explique la place toute particulière que possède aujourd'hui le Brésil sur le marché des carburants végétaux, due à son expérience, à son niveau de production, qui était encore, pour l'éthanol, le plus important à l'échelle mondiale en 2005 [78], et à la transformation de son parc automobile.

Pour l'Union Européenne et les États-Unis, ce sont les années 2000 qui ont marqué le réel regain de la production de carburants végétaux. Aux États-Unis, la production d'éthanol à partir de maïs a quadruplé entre 2000 et 2007, ce qui les place aujourd'hui comme les plus grands producteurs mondiaux d'éthanol [78]. En Europe, où la demande en carburants est particulière puisque dominée par le gazole, à hauteur d'environ 70 % [78], c'est la production d'EMHV, majoritairement à partir de colza, qui domine et qui fait de l'Europe la première zone productrice.

Cependant l'Europe est également une zone importatrice de carburants végétaux, importations nécessaires pour respecter ses ambitions en termes de consommation de ces carburants, fixée à 5,75 % de la consommation énergétique des transports en 2010 [80]. L'éthanol importé est majoritairement issu de la canne à sucre brésilienne, et les EMHV importés du soja américain et de l'huile de palme d'Asie du Sud-Est [78, 9].

En effet, un dernier acteur important est l'Asie du Sud-Est, et notamment la Malaisie et l'Indonésie. Si leur production locale d'EMHV reste aujourd'hui limitée (voir figure II.2), faute d'installations, les terres consacrées aux plantations de palmiers à huile ont augmenté de plus de 60 % entre 2000 et 2007 [70], afin de répondre à la demande mondiale alimentaire mais également énergétique puisqu'une partie de ces exportations d'huile est estérifiée dans les pays importateurs.

II. Analyse de Cycle de Vie des filières de 1^{ère} génération

Depuis plus d'une dizaine d'années, de très nombreuses études ont été réalisées afin d'établir les bilans d'ACV de différents carburants végétaux produits à l'échelle industrielle, c'est-à-dire de première génération. L'objectif de ce travail est d'analyser les études existantes, afin de synthétiser leurs résultats, ce qui sera présenté dans la présente section II, et d'en tirer les enseignements, qui fera l'objet de la section III suivante.

II.1. État des lieux

a) Filières et études considérées

Afin de garder une certaine cohérence dans les résultats analysés tout en disposant du nombre le plus important possible d'études existantes, les filières prises en compte sont celles, en accord avec les éléments exposés à la section I.5, présentant les plus hauts niveaux de production à l'échelle mondiale et européenne. Ainsi les productions considérées ont été celles :

- en Europe, d'éthanol issu de betterave et de blé, et d'EMHV de colza,
- aux États-Unis, d'éthanol issu de maïs,
- au Brésil, d'éthanol issu de canne à sucre, et
- en Asie du Sud-Est, d'EMHV issu d'huile de palme.

Le tableau II.2 page suivante regroupe, pour chacune de ces filières, le code de référence, l'année de réalisation, la portée géographique, l'horizon temporel, et les références des études considérées. En l'absence d'indications claires sur l'horizon temporel de travail, celui-ci a été pris comme l'année de réalisation de l'étude.

Une analyse plus exhaustive des études existantes portant sur ces filières aurait pu être réalisée, comme cela a déjà été fait auparavant [10, 81]. Cependant, comme il sera vu aux sections II.1.c et II.3.a, la méthodologie employée ici a été de travailler avec les données de base de ces études et non d'utiliser leurs résultats bruts. Ceci a impliqué une sélection supplémentaire, basée sur la disponibilité et la transparence des données.

Tableau II.2 - Caractéristiques de base des études considérées

| Carburant | Matière première | Étude | Année | Portée géographique | Horizon temporel | Références |
|-----------|------------------|---|------------|---|------------------|--------------|
| Éthanol | Betterave | CCPCS '91 | 1991 | France | 1991 et 2000 | [82] |
| | | Ademe '02 | 2002 | France | 2002 et 2009 | [83] |
| | | Bio-Fit '10 | 2000 | Allemagne ; France ; Pays-Bas | 2010 | [84] |
| | | GM '10 | 2002 | Europe | 2010 | [43] |
| | | JRC '10 | 2003 | Europe | 2010 | [85] |
| | | JRC '15 | 2007 | Europe | 2010-2020 | [42] |
| | Blé | SLU '02 | 2004 | Suède | 2002 | [86, 40, 41] |
| | | <i>Voir ci-dessus : CCPCS '91, Ademe '02, JRC '10 et JRC '15</i> | | | | |
| | Canne à sucre | Macedo '02 | 2004 | Région Centre-Sud brésilienne | 2002 | [87] |
| | | Pimentel '07 | 2007 | Brésil | 2007 | [88] |
| | | Oliveira '08 | 2008 | Brésil | 2008 | [89] |
| | | Boddey '08 | 2008 | Brésil | 2008 | [90] |
| | | JRC '15 | 2007 | Région Centre-Sud brésilienne et Europe | 2010-2020 | [42] |
| | Maïs | Shapouri '91 | 1995 | <i>Corn belt</i> ²⁰ américaine | 1991 | [38] |
| | | Shapouri '96 | 2002 | <i>Corn belt</i> américaine | 1996 | [39] |
| | | ANL '97 | 1997 | 4 états ²¹ de la <i>corn belt</i> | 1997 et 2005 | [91] |
| | | GREET '99 | 1999 | États-Unis | 1999 | [92] |
| | | Shapouri '01 | 2004 | <i>Corn belt</i> américaine | 2001 | [93] |
| | | Pimentel '03 | 2003 | États-Unis | 2003 | [94] |
| | | Pimentel '05 | 2005 | États-Unis | 2005 | [95] |
| ANL '12 | | 2006 | États-Unis | 2012 | [96] | |
| EMHV | Colza | Bio-Fit '10 | 2000 | Allemagne ; Autriche ; Danemark ; France ; Suisse | 2010 | [84] |
| | | <i>Voir ci-dessus : CCPCS '91, Ademe '02, SLU '02, GM '10, JRC '10 et JRC '15</i> | | | | |
| | Palme | Yusoff '07 | 2007 | Malaisie | 2007 | [97] |
| | | JRC '15 | 2007 | Asie du Sud-Est et Europe | 2010-2020 | [42] |

b) Résultats d'ACV des références pétrolières : essence et gazole

Avant d'analyser les performances énergie / gaz à effet de serre des filières de carburants végétaux, il est important de disposer de celles des références pétrolières que sont l'essence et le gazole, afin de servir d'étalon. La figure II.3 reporte les résultats d'ACV en termes de consommation d'énergie primaire et d'émissions de gaz à effet de serre provenant des études analysées. Les valeurs obtenues pour les émissions de gaz à effet de serre incluent les émissions de CO₂ dues à la combustion du carburant en lui-même en moteur.

20 La *corn belt* américaine désigne ici neuf états des États-Unis : Illinois, Indiana, Iowa, Minnesota, Nebraska, Ohio, Michigan, Dakota du Sud et Wisconsin.

21 Ces 4 états de la *corn belt* sont : l'Illinois, l'Iowa, le Minnesota et le Nebraska.

Les gammes obtenues pour les deux carburants sont assez similaires, avec des consommations d'énergie primaire comprises entre 1,05 et 1,18 MJ / MJ, et des émissions de gaz à effet de serre entre 79,3 et 89,2 gCO_{2-éq} / MJ. Ces variations, en comparaison avec celles qui seront présentées à la section c suivante relative aux carburants végétaux, et malgré les différences de données et de méthodes entre études, peuvent être considérées comme limitées, avec des écarts relatifs par rapport à la moyenne d'un peu moins de 12 %.

L'impact relevé par ces différentes études n'est pas tant dû à la production du carburant, incluant extraction du pétrole, transport, raffinage et traitements, qu'au carburant en lui-même. En effet le carburant représente une consommation énergétique de 1 MJ / MJ, soit 85 à 95 % des consommations d'énergie primaire totales, et des émissions au pot d'échappement dues à la combustion en moteur de 72,3 à 75,4 gCO_{2-éq} / MJ, soit 82 à 91 % des émissions totales.

En ne considérant que les phases de production, les variations entre les données de la littérature concernant l'impact de l'essence et du gazole sont importantes ; l'écart relatif observé par rapport à la moyenne pour les consommations d'énergie primaire est de 113 %, et pour les émissions de gaz à effet de serre de 85 %. Cependant cet impact est faible devant celui dû au carburant en lui-même, relativement cohérent entre études puisque ne dépendant que des caractéristiques propres des carburants telles que leur contenu en carbone.

Ces caractéristiques définissent donc une première base théorique de comparaison pour les bilans des carburants végétaux qui seront définis ultérieurement, de 1 MJ / MJ pour la consommation d'énergie et de 72,3 à 75,4 gCO_{2-éq} / MJ pour les émissions de gaz à effet de serre. En pratique des gains par rapport aux références pétrolières pourront toutefois être constatés jusqu'à des consommations de l'ordre de 1,10 MJ / MJ et des émissions de l'ordre de 85 gCO_{2-éq} / MJ.

Par la suite, ces valeurs de 1,10 MJ / MJ et de 85 gCO_{2-éq} / MJ serviront de base de comparaison pour définir les gains potentiels dus à l'utilisation de carburants végétaux.

Remarque : cette valeur de 85 gCO_{2-éq} / MJ issue de la bibliographie est cohérente avec la valeur de référence proposée par la directive 2009/28/CE, de 83,8 gCO_{2-éq} / MJ [65].

c) Résultats d'ACV des carburants végétaux

Les figures II.4 et II.5 présentent les résultats bruts d'ACV disponibles dans la bibliographie et plus particulièrement parmi les études référencées dans le tableau II.2, des filières de carburants végétaux étudiées pour, respectivement, les consommations d'énergie fossile et les émissions de gaz à effet de serre.

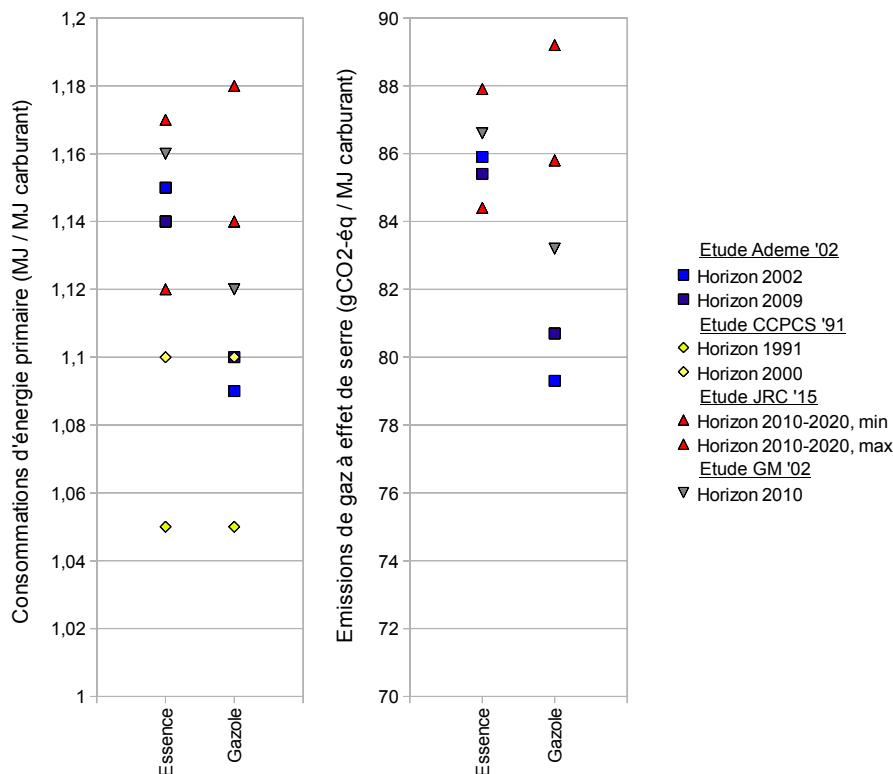


Figure II.3 - Consommations d'énergie primaire et émissions de gaz à effet de serre des filières essence et gazole, reportées selon différentes études

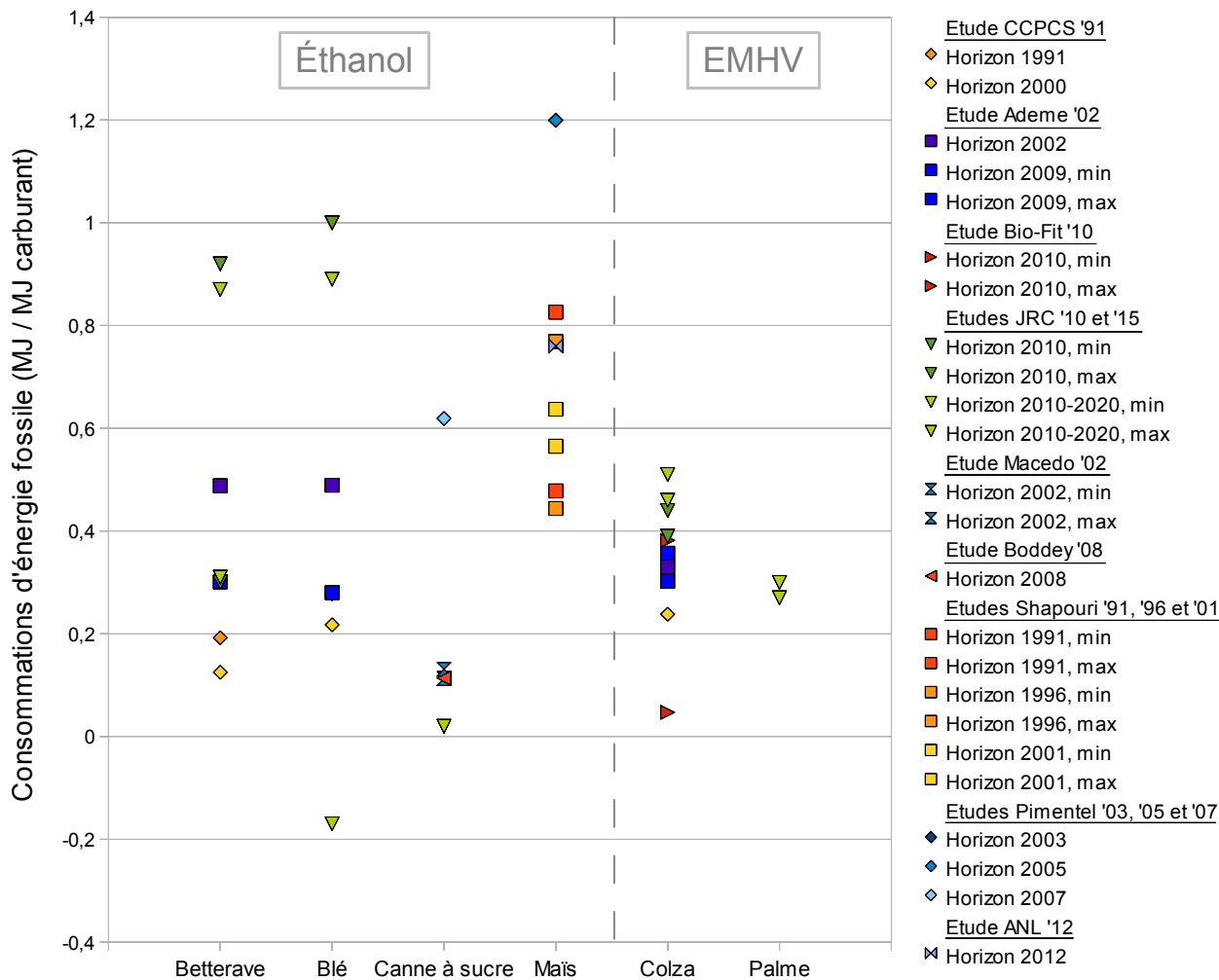


Figure II.4 - Résultats bruts d'ACV de consommations d'énergie fossile des carburants végétaux

Malgré le nombre limité d'études considérées, par rapport à la quantité de publications disponibles sur le sujet, les résultats affichés et retranscrits sur les deux figures II.4 et II.5 sont déjà très divergents. En excluant les filières et indicateurs renseignés par une seule source, c'est-à-dire la filière EMHV de palme pour les consommations d'énergie fossile et les filières éthanol de maïs et EMHV de palme pour les émissions de gaz à effet de serre, les gammes de variabilité constatées sont importantes, de 0,46 (EMHV de colza) à 1,17 MJ / MJ (éthanol de blé) pour les consommations d'énergie fossile, et de 8,8 (éthanol de canne à sucre) à 91,5 gCO_{2-éq} / MJ (éthanol de blé).

L'amplitude de ces gammes peut n'être absolument pas négligeable devant les résultats d'ACV des références pétrolières, vus à la section b précédente, soit 1,10 MJ / MJ et 85 gCO_{2-éq} / MJ. Certains résultats se situent même au-delà de ces résultats de référence, ce qui signifie que dans ces cas le carburant pétrolier a un impact énergie / gaz à effet de serre moindre que celui des carburants végétaux.

Une telle approche globale des résultats d'ACV ne permet donc pas de juger et de quantifier l'intérêt des carburants végétaux. Les résultats disponibles dans la bibliographie sont si divergents qu'ils peuvent mener à des décisions publiques totalement opposées concernant les carburants végétaux, de la promotion sans réserve au moratoire.

Il est donc nécessaire de détailler ces résultats disponibles et de comprendre l'origine de ces disparités. C'est pourquoi le présent travail, comme indiqué à la section II.1.a, a requis que les données de base de ces études soient disponibles.

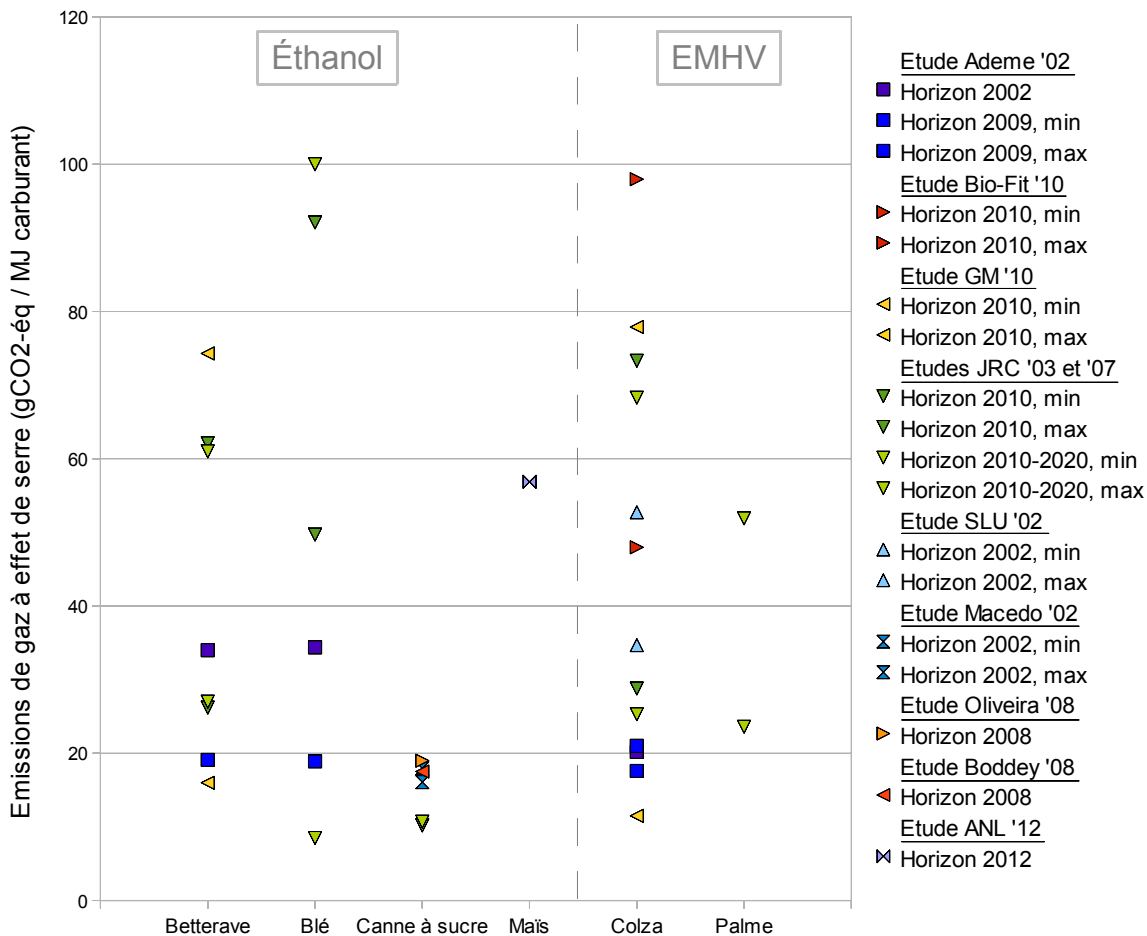


Figure II.5 - Résultats bruts d'ACV d'émissions de gaz à effet de serre des carburants végétaux

II.2. Socle commun d'hypothèses des études

L'objectif principal des 22 études listées dans le tableau II.2 est relativement commun : il s'agit généralement de dresser le bilan environnemental d'un ou plusieurs carburants végétaux afin, par comparaison avec leurs équivalents pétroliers, essence ou gazole, d'en justifier ou non le soutien et la promotion. En ce sens la démarche de ces ACV est *consécutives* (voir chapitre I, section II.2) puisqu'elles visent à déterminer l'impact de la mise en place et l'introduction des filières de carburants végétaux.

La *fonction* étudiée par ces études est la fourniture de carburants liquides pour le transport. Par conséquent l'*unité fonctionnelle* la plus adaptée pour l'analyse de ces filières de production de vecteurs énergétiques est le mégajoule MJ fourni par le carburant.

Le *système à étudier*, représenté à la figure II.6, est sensiblement le même pour chacune des filières, avec :

- une phase de culture de la matière première agricole, tenant compte notamment de l'ensemble des intrants nécessaires (carburant, engrais, produits phytosanitaires, etc) et de leurs processus de fabrication,
- une phase de transport de la matière agricole jusqu'au site de transformation en carburant,

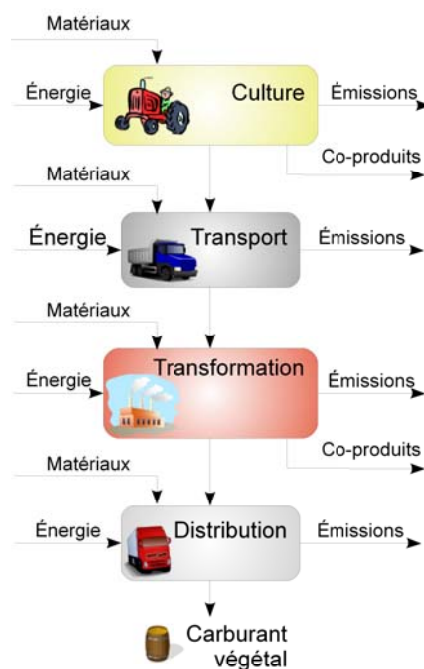


Figure II.6 - Système d'étude général d'un cycle de vie de carburant végétal

- une phase de transformation industrielle, basée sur une fermentation des éléments sucrés pour la production d'éthanol, ou sur une extraction des lipides et une estérification pour la production d'EMHV, et
- une phase de distribution du carburant jusqu'à la pompe.

Il existe cependant quelques exceptions à ce schéma général parmi lesquelles peuvent être cités :

- une éventuelle étape de stockage du produit agricole à proximité de son lieu de production, qui peut nécessiter un séchage ou une ventilation pour assurer sa bonne conservation,
- une possible séparation géographique de la phase de transformation telle qu'elle peut exister pour l'EMHV issu de palme par exemple, pour lequel l'huile de palme est extraite en Asie du Sud-Est et estérifiée dans le pays importateur, ou encore
- un élargissement du système dans les cas où la règle d'affectation employée pour gérer les co-produits du système est celle des impacts évités (voir chapitre I, section III.3.c) ; le système alternatif dépend alors du co-produit considéré et peut être la production d'un aliment de bétail de référence, tel que le tourteau de soja issu de l'agriculture américaine, le système de production national d'électricité, etc.

Le nombre d'*indicateurs d'impact* considérés par les différentes études est très variable, de l'analyse mono-critère au profil environnemental complet. La base la plus commune, et qui servira donc à ce travail, est le suivi de deux indicateurs particuliers : la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre.

Les consommations d'énergie prises en compte sont celles d'énergie primaire, en mégajoules MJ. Afin de rester en accord avec la majorité des études, l'énergie solaire captée via la photosynthèse a été exclue de ces consommations d'énergie, ce qui a pu nécessiter quelques adaptations dans les données de certaines études telles que *JRC '10* et *JRC '15* ; de plus cette hypothèse peut se justifier dans le sens où la valorisation de l'énergie solaire photosynthétique relève d'enjeux différents de ceux de la réduction des consommations d'énergie (voir section I.3.c). Ceci a également permis de ne pas exclure les études ne prenant en compte que les consommations d'énergie fossile en assimilant celles-ci aux consommations d'énergie primaire. Cette approximation peut se justifier par le faible écart constaté entre ces deux types de consommations au sein des études renseignant les deux indicateurs (*Ademe '02*, *JRC '03* et *'07*).

Enfin, une seconde énergie non prise en compte dans cette analyse globale est celle du travail humain, qui apparaît dans le bilan de culture de certaines études telles que *Shapouri '91*, *'96* et *'01*, et *Pimentel '03* et *'05*.

Trois gaz à effet de serre ont été pris en compte : le dioxyde de carbone CO₂, le méthane CH₄ et le protoxyde d'azote N₂O. Leurs émissions ont été exprimées en grammes de CO₂ équivalents gCO_{2-éq} selon la base la plus commune aux études, soit en utilisant des valeurs de Pouvoirs de Réchauffement Global (PRG, appelé aussi Global Warming Potential, GWP) de 1, 23 et 296, pour, respectivement le CO₂, le CH₄ et le N₂O, en accord avec le 3^{ème} rapport du GIEC de 2001 [98].

L'ensemble des *autres hypothèses* des études n'a pas été homogénéisé mais considéré comme des facteurs de variation des résultats. Parmi ces hypothèses peuvent être notamment cités : la règle d'affectation, le fait de négliger ou non certains éléments du cycle de vie, tels que la fabrication et la maintenance des engins agricoles par exemple, la portée géographique des données, etc. La section III considèrera plus avant l'effet de ces hypothèses sur les résultats finaux d'ACV.

II.3. Méthodologie d'analyse

a) Collecte des données

De façon schématique, les résultats d'ACV des filières de carburants végétaux se construisent à partir des différentes données de la façon représentée sur la figure II.7. Sur ce schéma les cases hachurées indiquent les données de base collectées au sein des études, et les cases colorées précisent les niveaux d'agrégation représentatifs des différentes phases du cycle de vie décrites à la section II.2 précédente et sur la figure II.6, et qui seront également utilisés par la suite (figures II.8 et II.9 notamment).

Sur la figure II.7 l'unité 'I' désigne l'unité relative à l'indicateur considéré, soit MJ pour les consommations énergétiques et gCO_{2-éq} pour les émissions de gaz à effet de serre (voir section II.2 précédente). Les trois cases sous le titre "Émissions par les sols" représentent les émissions de N₂O dues à l'application d'engrais azotés, et la case "Impact des résidus brûlés" concernent les émissions de CH₄ liées aux résidus de la culture de canne à sucre brûlés au champ ; ces quatre cases concernent donc uniquement l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre.

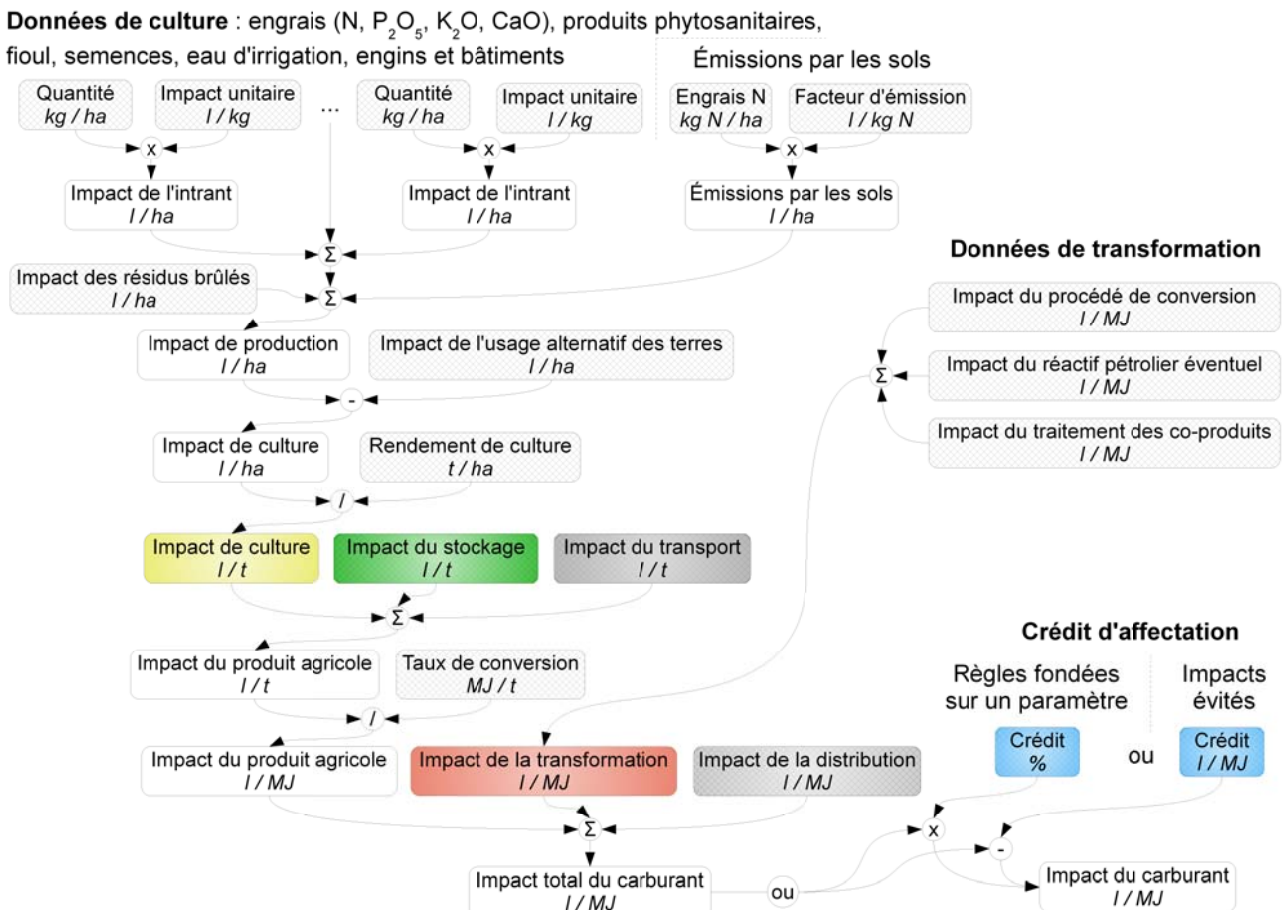


Figure II.7 - Construction schématique d'un résultat d'Analyse de Cycle de Vie à partir des données de base

Il apparaît sur la figure II.7 que la phase de culture est la plus complexe en termes de données nécessaires. La phase de transformation devrait être d'une complexité équivalente, or les données disponibles au sein des études sont bien moins transparentes concernant cette phase, ce qui explique le niveau de détails utilisé ici.

b) Performances environnementales des filières considérées

Pour chaque donnée de base identifiée sur la figure II.7, les valeurs des études et de leurs différents scénarios ont été prises en compte. Les grandeurs inchangées pour différents scénarios

d'une même étude n'ont été utilisées qu'une seule fois afin d'éviter d'introduire un biais de pondération en faveur des études distinguant plusieurs scénarios très proches en termes de données.

Le nombre de combinaisons possibles de ces données de base s'est avéré très variable selon les filières et les indicateurs : nul pour les émissions de gaz à effet de serre de l'éthanol de maïs et de l'EMHV de palme, par manque d'études ou de détail des calculs au sein de celles-ci, faible pour les consommations énergétiques de l'EMHV de palme avec quelques centaines de combinaisons, et très significatif pour les autres, jusqu'à atteindre 2.10^{25} combinaisons pour les émissions de gaz à effet de serre de la filière EMHV de colza, à travers les 32 scénarios envisagés par les 7 études considérées. Une approche statistique a donc pu être employée afin de déterminer les résultats médians des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre des filières de carburants. A la manière d'une simulation de Monte-Carlo à distributions discrètes, un tirage aléatoire parmi les données des études considérées a été effectué pour chacune des données de base, ce qui a permis de calculer les résultats intermédiaires et finaux. La médiane et l'écart interquartile des résultats des filières ont alors été obtenus à partir d'un échantillon de 50000 tirages.

II.4. Résultats d'ACV médians des carburants végétaux

Le tableau II.5 suivant présente les résultats d'ACV finaux, après affectation aux co-produits, de consommation d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre, obtenus selon la méthodologie décrite à la section II.3 pour les différentes filières considérées. Comme précisé à la section II.3.b, les résultats d'émissions de gaz à effet de serre des filières d'éthanol de maïs et d'EMHV de palme sont manquantes, par défaut d'études portant sur cet indicateur et de transparence (idem figure II.9).

Tableau II.3 - Résultats d'ACV des carburants végétaux, après affectation aux co-produits

| Filières | | Consommation d'énergie (MJ / MJ) | | | Émissions de GES (gCO ₂ -éq / MJ) | | |
|-----------|------------------|----------------------------------|---------|------------------------------|--|---------|------------------------------|
| Carburant | Matière première | 1 ^{er} quartile Q1 | Médiane | 3 ^{ème} quartile Q3 | 1 ^{er} quartile Q1 | Médiane | 3 ^{ème} quartile Q3 |
| Éthanol | Betterave | 0,30 [-36 %] | 0,47 | 0,61 [+31 %] | 22,9 [-31 %] | 33,2 | 44,9 [+35 %] |
| | Blé | 0,20 [-62 %] | 0,53 | 0,80 [+52 %] | 26,6 [-42 %] | 45,8 | 67,2 [+47 %] |
| | Maïs | 0,66 [-17 %] | 0,79 | 0,93 [+18 %] | N/A | | |
| | Canne à sucre | 0,05 [-62 %] | 0,13 | 0,25 [+86 %] | 12,2 [-26 %] | 16,4 | 21,7 [+32 %] |
| EMHV | Colza | 0,01 [-96 %] | 0,27 | 0,37 [+37 %] | 26,9 [-31 %] | 38,8 | 53,5 [+38 %] |
| | Palme | 0,12 [-22 %] | 0,16 | 0,20 [+23 %] | N/A | | |

Les disparités dans les résultats finaux sont très importantes puisque l'écart interquartile peut représenter, selon la filière et l'indicateur, de 35 à 148 % de la médiane.

a) Consommations énergétiques

Les résultats intermédiaires de consommations d'énergie des différentes phases du cycle de vie sont donnés sur la figure II.8. Dans un souci de lisibilité, seuls les écarts interquartiles les plus importants, relatifs aux phases de culture et de transformation et au crédit d'affectation, ont été représentés.

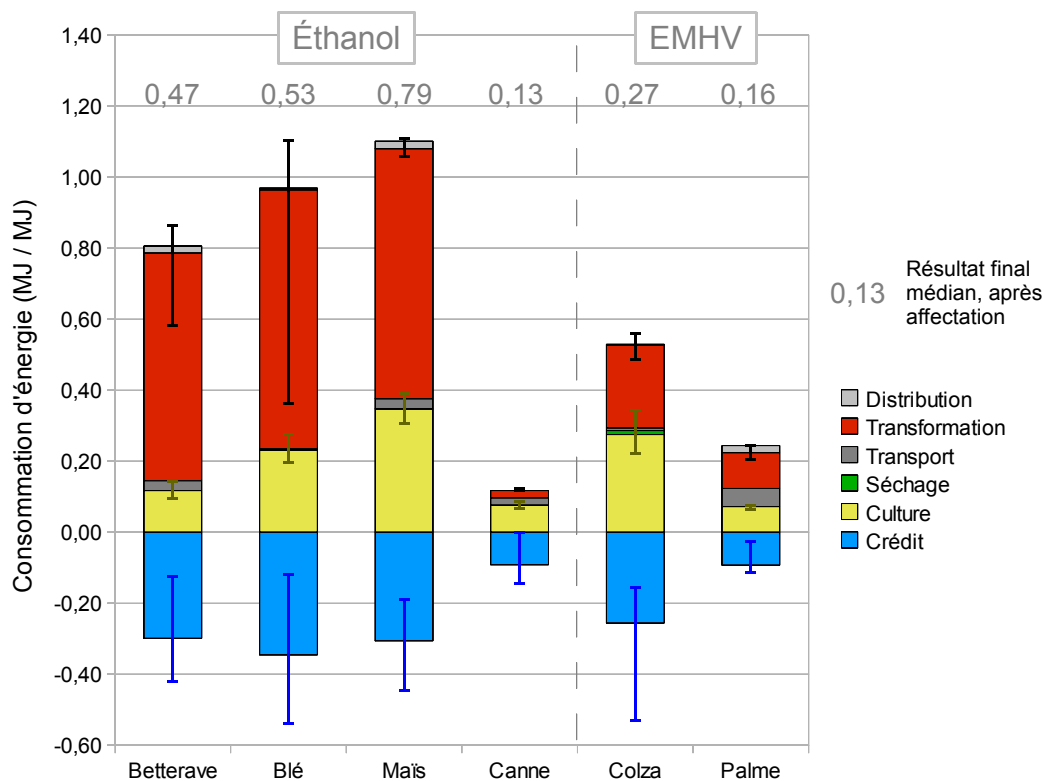


Figure II.8 - Consommations d'énergie des filières considérées

Le bilan énergétique des filières d'éthanol de betterave, blé et maïs est dominé, à hauteur de 64 à 81 % du résultat avant affectation, par la phase de transformation. En valeur absolue, les consommations énergétiques liées à la transformation du blé et du maïs en éthanol sont proches, respectivement de 0,73 et de 0,70 MJ / MJ, ce qui est cohérent puisque les deux procédés sont similaires, basées sur l'hydrolyse puis la fermentation de l'amidon contenu dans les grains.

A l'opposé les consommations énergétiques de transformation associées à la betterave et la canne à sucre, sont très différentes, respectivement de 0,64 et de 0,02 MJ / MJ. Malgré certaines différences non négligeables dans les procédés qui seront vus plus en détail au chapitre III, la raison majeure de cet écart est le fait que dans le cas de la canne à sucre, le résidu solide après extraction du sucre, la bagasse, est utilisé pour fournir chaleur et électricité nécessaires au procédé.

Concernant les filières EMHV, les consommations énergétiques de transformation sont plus faibles que dans le cas de l'éthanol, avec une consommation de 0,23 et de 0,10 MJ / MJ pour, respectivement, le colza et la palme. Là encore, la différence entre ces deux filières s'explique notamment par le fait que dans le cas de la palme, l'énergie nécessaire à l'extraction de l'huile est fournie par les régimes de fruits vides.

Concernant les écarts interquartiles, il est important de préciser que celui lié à la transformation du blé est particulièrement important dû à l'étude *SLU '04*, présentant des valeurs excessivement basses, comprises entre 0,08 et 0,13 MJ / MJ tandis que celles des autres études se situent entre 0,67 et 0,89 MJ / MJ. Le chapitre III montrera que ce deuxième groupe de valeurs, en l'absence d'éléments justificatifs clairs au sein de l'étude *SLU '04*, est le plus crédible.

Tableau II.4 - Gammes de productivité par hectare en carburants, issues des études considérées

| Filières | | Productivité par hectare (GJ carburant / ha) |
|----------|---------------|--|
| Éthanol | Betterave | 104 - 243 |
| | Blé | 52 - 77 |
| | Maïs | 61 - 73 |
| | Canne à sucre | 124 - 137 |
| EMHV | Colza | 28 - 69 |
| | Palme | 148 |

Les consommations énergétiques de la phase de culture, comprises, toutes filières confondues, entre 0,07 (palme) et 0,35 MJ / MJ (maïs), ne marquent pas de distinction entre les deux filières de carburants. Le classement entre cultures paraît plutôt lié à la productivité par hectare, donnée dans le tableau II.4, et l'ensoleillement de la région étudiée ; la section III de ce chapitre confirmera l'importance des paramètres de rendement cultural et de taux de conversion pour les résultats d'ACV. Toutefois, concernant les strictes caractéristiques des cultures, si les résultats ne montrent pas d'avantage clair pour les plantes en C4 (maïs, canne à sucre) par rapport aux plantes en C3, les plantes pérennes (canne à sucre, palmier à huile) semblent présenter un intérêt plus net que les plantes annuelles.

Les crédits d'affectation occupent une place importante, quoique très variable, au sein de ces bilans, comptant pour 28 (maïs) à 47 % (colza) des résultats avant affectation.

Enfin les consommations énergétiques liées au séchage, transport et distribution, sont généralement limitées. Pour les filières à utilisation locale, soit la betterave, le blé, le maïs et le colza, leurs parts cumulées sont inférieures à 0,05 MJ / MJ, soit à maximum 6 % du total. Cependant en cas d'exportation, étudiée pour la canne et la palme, les phases de transport associées peuvent atteindre respectivement 0,09 et 0,07 MJ / MJ, soit 32 et 31 % des bilans globaux avant affectation.

b) Émissions de gaz à effet de serre

Les résultats intermédiaires d'émissions de gaz à effet de serre, pour les quatre filières disponibles, sont donnés sur la figure II.9. De la même façon que pour la figure II.8, seuls les écarts interquartiles relatifs aux phases de culture et de transformation et au crédit d'affectation, ont été reportés.

La plupart des conclusions relatives aux consommations énergétiques sont également valables ici. Il peut cependant être constaté que la part des émissions liées à la phase de culture dans le bilan avant affectation est plus importante ici que dans le cas précédent, jusqu'à en devenir, à l'exception du cas de l'éthanol de betterave, majoritaire.

Le rôle du crédit d'affectation dans les bilans totaux est toujours important et variable, avec une part, par rapport au résultat avant affectation, comprise entre

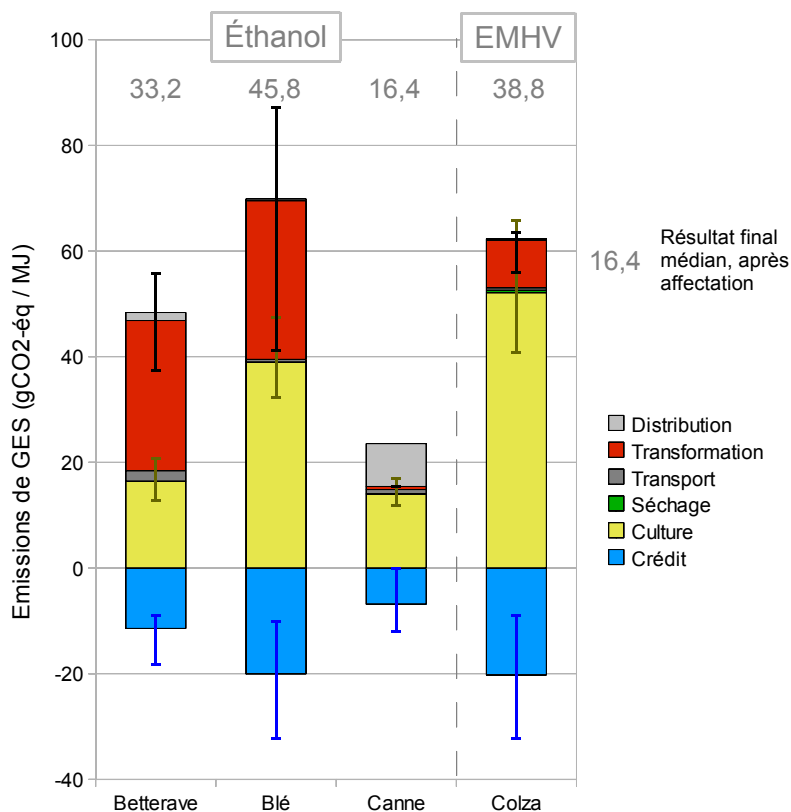


Figure II.9 - Émissions de gaz à effet de serre des filières considérées

23 (betterave) et 33 % (colza) en considérant les médianes, mais entre 0 (canne) et 53 % (colza) en prenant en compte les quartiles.

Les séchage, transport et distribution, jouent cette fois encore un rôle mineur en l'absence d'exportation, avec des émissions cumulées maximales de 3,6 gCO_{2-éq} / MJ, soit 7 %. A l'inverse, dans le cas de l'éthanol de canne à sucre produit au Brésil et exporté vers l'Europe, l'impact du transport peut atteindre 9,0 gCO_{2-éq} / MJ, soit 38 % du bilan avant affectation.

III. Origines des disparités des ACV des carburants végétaux

La section II précédente a montré que les résultats d'ACV relatifs aux carburants végétaux peuvent être très variables selon les études. L'objectif de la présente section est d'identifier les causes d'une telle disparité.

III.1. Méthodologie d'analyse

Afin de déterminer l'influence des paramètres des études d'ACV portant sur les carburants végétaux, une **analyse de sensibilité** a été menée à partir des données collectées au sein des différentes études considérées. Cependant afin de ne pas introduire de biais dû à un trop faible nombre d'études et de données, cette analyse n'a porté que sur les filières présentant plus de vingt scénarios, soit les trois filières européennes d'éthanol de blé et de betterave et d'EMHV de colza.

Pour chacune des données de base (voir figure II.7 et, plus généralement, section II.3.a), le nombre de données collectées a été suffisant pour définir une médiane. La *variation* due à un paramètre particulier de donnée est alors la variation du résultat final produite lorsque cette donnée varie du minimum au maximum des valeurs relevées dans les études, tandis que l'ensemble des autres données de base est fixé à leur valeur médiane. L'*influence d'un paramètre d'ACV* a alors été définie comme la moitié de cette variation, divisée par les résultats finaux médians des filières, présentés dans le tableau II.5.

Exemple : lorsque le taux de conversion de la betterave en éthanol varie de son minimum à son maximum, et que les autres données sont prises égales à leur médiane, le résultat final pour l'indicateur des émissions de gaz à effet de serre varie de 29,6 à 37,5 gCO_{2-éq} / MJ, soit une différence de 7,9 gCO_{2-éq} / MJ. L'influence de ce paramètre pour cet indicateur est donc la moitié de cette variation, soit 4,0 gCO_{2-éq} / MJ, divisée par le résultat final médian, 33,2 gCO_{2-éq} / MJ (voir tableau II.5), soit 11,9 %.

Note : cette définition de l'influence d'un paramètre permet de considérer que si celle-ci est de 25 %, alors grossièrement, le résultat final médian peut varier de plus ou moins 25 % à cause de ce paramètre. Cette représentation, même si elle permet de donner un sens plus pratique à cette définition, n'est cependant qu'une approximation dans le sens où les gammes de variation ne sont pas obligatoirement centrées sur le résultat final médian.

Comme il a été indiqué à la section II.3.a, le nombre de données de base relatives à la phase de culture est conséquent. Afin de faciliter l'analyse des résultats, celles-ci ont donc été réparties en trois catégories :

- la *spécificité locale* associe les paramètres liés à une condition locale, telle que le type de sol, le climat, ou l'itinéraire technique,
- les *approximations* regroupent les paramètres considérés comme négligeables par certaines études ou peu renseignés, et
- les *incertitudes* désignent les données soumises à des incertitudes de modélisation ; cette catégorie ne concerne ici que le facteur d'émission associé aux émissions de N₂O par les sols.

L'influence de ces catégories a alors été définie de la même façon que précédemment, mais en faisant varier l'ensemble des données les constituant. La variation du résultat final due à la catégorie est la différence entre les résultats des deux configurations extrêmes de données.

Le tableau II.3 précise la répartition des données culturelles de base (voir figure II.7) selon ces trois catégories. Dans ce tableau les données "Rendement de culture : spécificité locale" sont un sous-ensemble des données "Rendement" désignant les valeurs issues de rendements constatés et non d'hypothèses prospectives.

Tableau II.5 - Répartition des données culturelles de base selon les trois catégories de données

| Spécificité locale | Approximations | Incertitudes |
|--|--|---|
| Engrais N, P ₂ O ₅ , K ₂ O et CaO : quantité et impact unitaire Produits phytosanitaires : quantité et impact unitaire Fioul : quantité Semences : quantité Engins et bâtiments : quantité Émissions par les sols : engrais N Rendement de culture : spécificité locale | Semences : impact unitaire Engins et bâtiments : impact unitaire Impact de l'usage alternatif des terres | Émissions par les sols : facteur d'émission |

Enfin, cette analyse de sensibilité systématique portant sur les données d'ACV a été complétée par une analyse de l'influence des paramètres méthodologiques, tels que la règle d'affectation, ou plus structurels, tels que le type d'énergie utilisée lors de la phase de transformation. Le principe de cette analyse et la définition de l'influence de ces paramètres sont les mêmes que précédemment, à l'exception du fait que les valeurs étudiées n'impliquent pas systématiquement l'ensemble des études mais plus généralement quelques scénarios proches d'une ou plusieurs études.

III.2. Influence des paramètres d'ACV sur les résultats finaux

La figure II.10 présente les résultats de l'analyse de sensibilité pour l'ensemble des paramètres d'ACV, à l'exception des données de culture regroupées selon les trois catégories définies précédemment (voir tableau II.3).

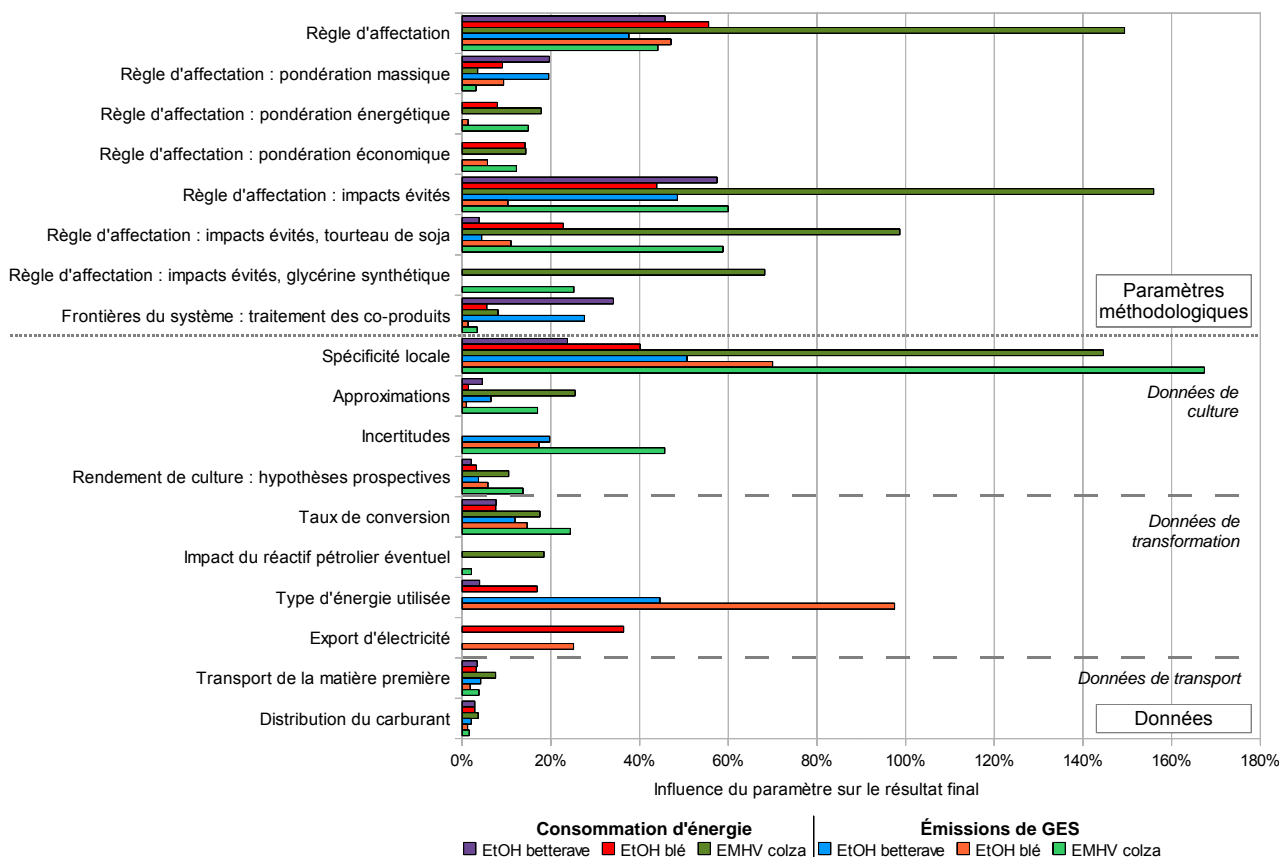


Figure II.10 - Influence de l'ensemble des paramètres d'ACV sur le résultat final

Les influences mesurées présentent des valeurs très élevées, ce qui explique la forte variabilité constatée précédemment des résultats d'ACV (voir figures II.4 et II.5). En effet, et à titre d'exemple, si on considère une gamme de variation centrée sur la médiane, il existe un facteur 2 entre les résultats finaux extrêmes à partir d'une influence de 33 %, et neuf des paramètres considérés sur la figure II.10 présentent des influences supérieures à ce chiffre pour une ou plusieurs filières et

indicateurs : le choix de règle d'affectation, le choix du système alternatif ou la définition de celui-ci (impact du tourteau de soja ou de la glycérine synthétique) lors de l'application d'une règle d'affectation par impacts évités, l'inclusion ou non des processus de traitement des co-produits des filières au sein des frontières du système, la spécificité locale et les incertitudes des données de culture, le type d'énergie utilisée pendant la phase de transformation ou l'éventuelle exportation d'électricité vers le réseau.

Compte tenu de l'importance des influences des données de culture, la figure II.11 détaille ces résultats.

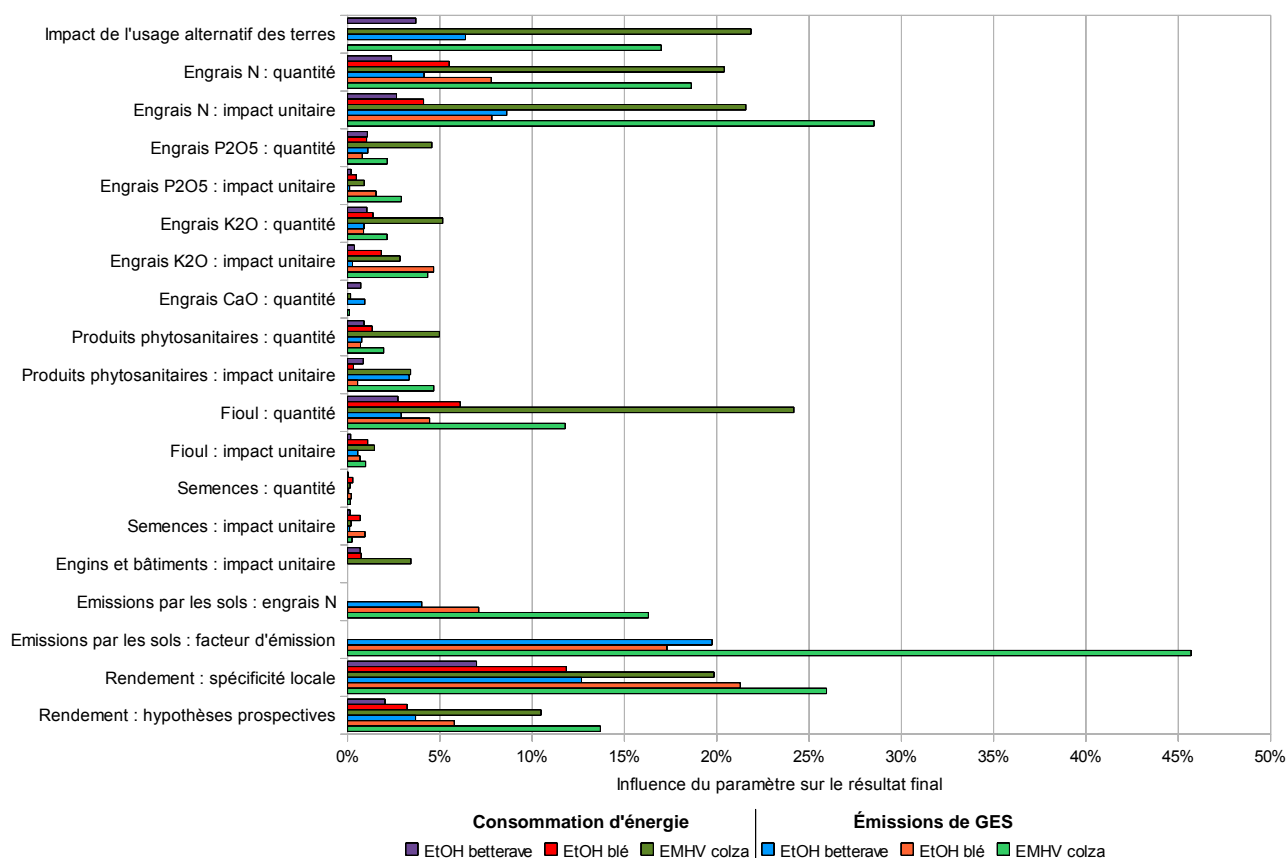


Figure II.11 - Influence des données de culture sur le résultat final

Les résultats de la figure II.11 montrent que certaines données de culture se distinguent nettement des autres pour leur influence potentielle sur le résultat final : les données et hypothèses relatives aux émissions de N₂O par les sols, aux engrais azotés et aux rendements de culture, la quantité de fioul consommé, et l'impact de l'usage alternatif des terres. Le recueil de ces données doit donc être réalisé avec une grande attention lors de l'inventaire de cycle de vie, notamment pour les filières d'EMHV, plus sensibles aux données de cultures (voir figure II.11) puisque la part de la phase de culture dans les résultats finaux est plus importante dans leur cas (voir figures II.8 et II.9).

III.3. Déterminants d'une application adéquate de l'ACV aux carburants végétaux

La présente section constitue l'interprétation des résultats de l'analyse de sensibilité précédente. Les valeurs d'influence utilisées lors de l'argumentation sont donc celles issues de cette analyse et représentées sur les figures II.10 et II.11, auxquelles le lecteur pourra se référer.

a) Méthodologie de l'ACV

Les résultats de l'analyse de sensibilité ont montré la très forte influence des choix méthodologiques sur les résultats d'ACV. Le choix de la règle d'affectation, notamment, s'est révélé

comme un élément crucial pour la valeur finale des indicateurs, avec une influence comprise entre 38 (EtOH betterave, émissions de GES) et 149 % (EMHV colza, consommation d'énergie).

Or le chapitre I a souligné le lien étroit existant entre l'objectif de l'étude et la méthodologie à mettre en œuvre (voir notamment chapitre I, sections II.2 et III.4, sur la distinction entre les deux catégories attributive et consécutive d'études d'ACV). Comme indiqué à la section II.2, l'*objectif de l'étude par ACV* des filières de carburants végétaux est ici de **déterminer l'intérêt, vis-à-vis d'objectifs de réduction des consommations d'énergie et de diminution des émissions de gaz à effet de serre, de la mise en place de filières de production de carburants végétaux**. La démarche est donc *consécutive*, comparant, généralement implicitement dans les études considérées, une situation avec à une situation sans ces filières de carburants.

La *règle d'affectation* appropriée est donc la méthode des *impacts évités*. L'identification des effets de substitution est possible à condition que les deux scénarios d'étude, un avec et l'autre sans carburants végétaux, soient clairement définis. En pratique cependant, les études d'ACV n'explicitent pas le scénario de référence "sans" et identifient les effets de substitution à l'aide de l'expérience des dernières années. Comme il sera vu dans les paragraphes suivants et à la section b, cette méthode d'utilisation marginale du scénario de référence présente d'importants défauts.

L'importance de la définition précise des scénarios à comparer est confirmée par la variabilité observée lors de l'application de la règle d'affectation des impacts évités, d'influence comprise entre 10 (EtOH blé, émissions de GES) et 156 % (EMHV colza, consommation d'énergie). Ceci signifie que la voie identifiée de valorisation des co-produits est déterminante pour la performance de la filière dans son ensemble. Inversement, l'emploi de règles d'affectation fondées sur un paramètre intrinsèque des produits, tels que la masse ou l'énergie, qui ne tiennent pas compte du devenir des co-produits, peut rapidement conduire à des résultats très différents de la réalité. S'il peut éventuellement être fait appel à de telles règles, certes plus simples d'un point de vue pratique, en vue d'une comparaison rapide de filières de carburants végétaux, tel que le préconise la directive 2009/28/CE du 23 avril 2009 traitant notamment de la certification de telles filières [65], celles-ci ne doivent en aucun cas servir de base à la définition d'objectifs nationaux ou internationaux de consommation de carburants végétaux et, plus généralement, à l'aide à la décision publique.

Exemple : le tableau II.6 présente les crédits d'affectation associés à la glycérine, co-produit des filières d'EMHV, à hauteur de 100 kg produits pour chaque tonne d'EMHV (voir section I.4), selon la voie de valorisation et d'après les différentes études considérées.

Tableau II.6 - Crédit d'affectation associé à la glycérine des filières EMHV selon sa voie de valorisation

| Voie de valorisation de la glycérine | Étude | Crédit de consommation d'énergie (MJ / MJ EMHV) | Crédit d'émissions de GES (gCO _{2-éq} / MJ EMHV) |
|--------------------------------------|-----------------------|---|---|
| Glycérine synthétique | <i>Bio-Fit '00</i> | 0,34 - 0,42 | 15,0 - 18,5 |
| | <i>GM '02</i> | 0,43 | 25,7 |
| | <i>SLU '04</i> | 0,36 | 15,9 |
| | <i>JRC '03 et '07</i> | 0,06 - 0,07 | 6,2 - 14,3 |
| Combustible | <i>GM '02</i> | 0,05 | 0,6 |
| Aliment pour bétail | <i>JRC '03 et '07</i> | 0,01 | 0,8 - 1,1 |

Malgré des différences notables entre études, les écarts entre voies de valorisation sont nettes, à l'avantage de la substitution de la glycérine synthétique, et non négligeables par rapport aux résultats médians avant affectation pour la filière d'EMHV de colza, de 0,54 MJ / MJ EMHV et de 61,4 gCO_{2-éq} / MJ EMHV. Or en considérant uniquement l'objectif européen d'une consommation de 5,75 % de carburants végétaux en 2010, les quantités produites de glycérine par les filières d'EMHV seront plus importantes que l'actuel marché mondial de glycérine synthétique [8, 99]. S'il n'induit pas d'innovation suffisante, ce phénomène revêtira donc une importance particulière pour la performance énergie / GES des filières d'EMHV, appelée à fortement baisser, ce que ne traduit pas les affectations fondées sur un paramètre intrinsèque des co-produits.

L'analyse de sensibilité a également montré l'influence sur les résultats finaux que peut avoir l'inclusion ou non des étapes de traitement des co-produits au sein des frontières du système, c'est-à-dire de subdivision des processus, de 6 à 34 % pour la consommation d'énergie et de 1 à 28 % pour les émissions de GES. Ce choix ne se pose pas lors de l'application d'une méthode d'affectation par impacts évités, puisque celle-ci nécessite d'inclure toutes les étapes nécessaires à la valorisation des co-produits, qu'il s'agisse de traitements ou de transport, afin que la comparaison avec le système alternatif soit correcte.

Dans le cas d'ACV simplifiées employant des règles d'affectation fondées sur un paramètre, en accord avec les recommandations formulées quant à la pertinence de la subdivision (voir chapitre I, section III.2.b), il est recommandé d'inclure ces étapes de traitement au sein des frontières du système. Cette recommandation possède de plus deux avantages intéressants : elle permet de conserver une cohérence avec les ACV plus complètes employant une affectation par impacts évités, et elle s'inscrit dans l'objectif de simplification de l'analyse puisque ne pas appliquer de subdivision permet généralement, en pratique, de considérer l'impact du site industriel concerné dans son ensemble sans nécessiter d'en détailler le procédé.

b) Qualité des données

La spécificité locale s'est révélée être un élément déterminant pour le résultat final, avec des résultats d'influence compris entre 24 (EtOH betterave, consommation d'énergie) et 167 % (EMHV colza, émissions de GES). Ces valeurs sont cependant sur-estimées du fait de l'approche statistique adoptée ici ; en effet celle-ci suppose que les paramètres étudiés sont indépendants entre eux, ce qui n'est pas vrai compte tenu des relations agronomiques existantes, telles qu'entre le niveau de fertilisation et le rendement obtenu. Néanmoins les résultats obtenus sont tels qu'il peut être considéré que l'identification de la spécificité locale comme un paramètre déterminant pour le résultat final reste pertinente.

Exemple : comme indiqué à la section III.1, l'influence de la spécificité locale a été mesurée en considérant les configurations extrêmes, en termes de résultat final, des paramètres relevant de cette catégorie. Si le calcul est refait en associant les faibles niveaux d'intrants aux faibles rendements, et inversement, les résultats d'influence obtenus sont inférieurs d'un facteur 1,9 à 3,7. Ce facteur, certes élevé, ne suffit pas à négliger l'importance de la spécificité locale puisque les influences mesurées sont alors comprises entre 7 et 85 %.

Cette variabilité des résultats finaux selon les conditions locales de culture ne peut pas être corrigée en tant que telle dans le sens où elle est le reflet de la diversité des situations et des pratiques. Elle est ainsi inhérente à la portée géographique choisie, qui doit donc être limitée autant que possible à des zones cohérentes du point de vue agricole.

Les incertitudes portant sur les émissions de N₂O par les sols sont également une source importante de variabilité des résultats. De ce point de vue, l'analyse a montré que cet effet est plus dû au facteur d'émission retenu, présentant des influences de 17 à 46 %, qu'aux quantités d'engrais azotés considérées, aux influences inférieures à 16 %.

Ce facteur d'émission, qui permet de déduire les émissions de N₂O par les sols à partir des quantités d'engrais azotés appliquées, dépend de nombreux paramètres locaux [100, 101, 102, 103, 104] : les caractéristiques physiques et structurelles du sol, l'activité biologique, le couvert végétal et les conditions climatiques. Au-delà des limites théoriques de compréhension et de modélisation des émissions de N₂O, l'incertitude portant sur ce facteur d'émission est en lien étroit avec ces conditions très localisées [104].

Dans la plupart des études considérées, l'impact lié aux engins et bâtiments agricoles est considéré comme négligeable ; cette hypothèse est issue de la pratique industrielle de l'ACV, pour laquelle l'impact de la fabrication et de la maintenance des équipements est négligeable devant l'impact de leur utilisation (consommables), du fait de leur utilisation généralement quasi-ininterrompue pendant de nombreuses années. Cependant malgré cette limite de l'analyse de sensibilité, puisque seule, pour les filières européennes, l'étude *CCPCS '91* a précisé une valeur portant sur la consommation d'énergie liée à la fabrication des engins et bâtiments, il apparaît que cet impact peut ne pas être négligeable. Cette tendance est confirmée par d'autres études, qui ont

montré que l'impact des engins et bâtiments peut compter pour plus d'une dizaine de pour-cents de l'impact de culture, soit quelques pour-cents de l'impact du carburant [63, 105].

De la même façon, les valeurs disponibles dans les études pour l'impact de l'usage alternatif des terres sont relativement limitées : nulle si ce paramètre n'est pas considéré (*CCPCS '01*, *Ademe '02* et *SLU '04*) ou supposé négligeable (*JRC '03* et *'07*), négative, ce qui en fait un impact additionnel pour la filière de carburant, si elle correspond à l'effet fertilisant qu'aurait eu une culture de légumineuse (*GM '02*), ou positive, soit un crédit pour la filière de carburant, si elle traduit les activités de maintenance sur une terre en jachère (*Bio-Fit '00*). Malgré ce nombre réduit d'options, les influences mesurées sont de 4 (consommation d'énergie) et 6 % (émissions de GES) pour l'éthanol de betterave, et de 22 (consommation d'énergie) et 17 % (émissions de GES) pour l'EMHV de colza.

Cette influence de l'usage alternatif des terres, déjà relativement élevée, peut être appelée à augmenter très fortement si les variations de stocks de carbone des sols et de la biomasse aérienne sont incluses dans l'étude, et que d'autres usages alternatifs, tels que des retournements de prairie ou des déforestations, sont identifiés. De nouveau il apparaît donc que l'évaluation des filières de carburants végétaux s'inscrit dans une comparaison de scénarios dans lesquels, compte tenu de leur influence potentielle sur le résultat final, l'utilisation des terres et son évolution doit être correctement décrite. Le chapitre IV traitera plus particulièrement de cette problématique.

Les hypothèses prospectives sur les rendements de culture ont également un impact non négligeable sur les résultats finaux des filières, avec des influences mesurées comprises entre 2 et 14 %. Deux types de prospectives peuvent être distinguées parmi les études considérées : la projection des augmentations de rendement observées sur les dernières décennies (*Ademe '02*), ou une mise à niveau des rendements sur ceux des régions les plus performantes (*CCPCS '91* ou *JRC '07*). Or, compte tenu des incertitudes sur le devenir de l'agriculture vis-à-vis des effets potentiels du changement climatique [106, 107, 108, 109], de telles hypothèses, notamment la première, peuvent apparaître comme optimistes.

Enfin, malgré les limites, précisées à la section II.3.a, relatives à la transparence des données industrielles disponibles dans les études, deux éléments importants transparaissent :

- le taux de conversion de la matière première agricole en carburant, de la même façon que le rendement de culture, est un facteur de division important pour le résultat final (voir figure II.7), présentant des influences comprises entre 8 et 24 %, et
- la prise en compte de différentes sources d'énergie, notamment lorsqu'est considérée la biomasse via une récolte de pailles, ou l'étude de structures industrielles permettant une exportation d'électricité et donc, au niveau des bilans d'ACV, un crédit d'affectation, peuvent induire des variations des résultats finaux de, respectivement, 4 à 97 % et 25 à 36 %. Dans les deux cas, les frontières du système doivent être correctement définies et renseignées pour chacun des scénarios.

Exemple : l'apport d'énergie pour la transformation de blé en éthanol peut être assurée par une récolte des pailles de culture (voir [42] ou chapitre III). Lorsque l'étude d'ACV d'une telle solution est envisagée, il est alors nécessaire de considérer l'utilisation de ces pailles dans le scénario de référence sans filière de production d'éthanol : si les pailles sont laissées au champ, les effets agronomiques de leur récolte sont à prendre en compte, ou si, dans un contexte de concurrence d'usage sur ces pailles, elles sont utilisées pour alimenter une centrale à biomasse, la comparaison doit également en tenir compte.

III.4. Utilisation pertinente de la bibliographie

Les différents résultats de ce chapitre ont montré à la fois que la réalisation d'une ACV d'un carburant végétal est complexe et gourmande en temps, compte tenu de la quantité de données à recueillir et de la diversité des acteurs impliqués (agriculteurs, sites industriels de transformation, filières de substitution des co-produits), et que les résultats disponibles dans la bibliographie ne peuvent que rarement être utilisés tels quels compte tenu de leur variabilité vis-à-vis des différentes possibilités d'approches et de données.

Cependant il est peu concevable de réaliser une nouvelle étude d'ACV pour chaque problématique de décision publique relative aux carburants végétaux compte tenu du nombre d'études déjà produites et de l'urgence dans laquelle s'inscrivent ces besoins d'aide à la décision publique. Afin de faire face à cette difficulté, et à partir des résultats obtenus à la section III.3 précédente, la figure II.12 propose une démarche permettant de répondre à un besoin d'ACV de carburants végétaux à partir de la bibliographie tout en assurant une pertinence minimale du résultat vis-à-vis de la question posée.

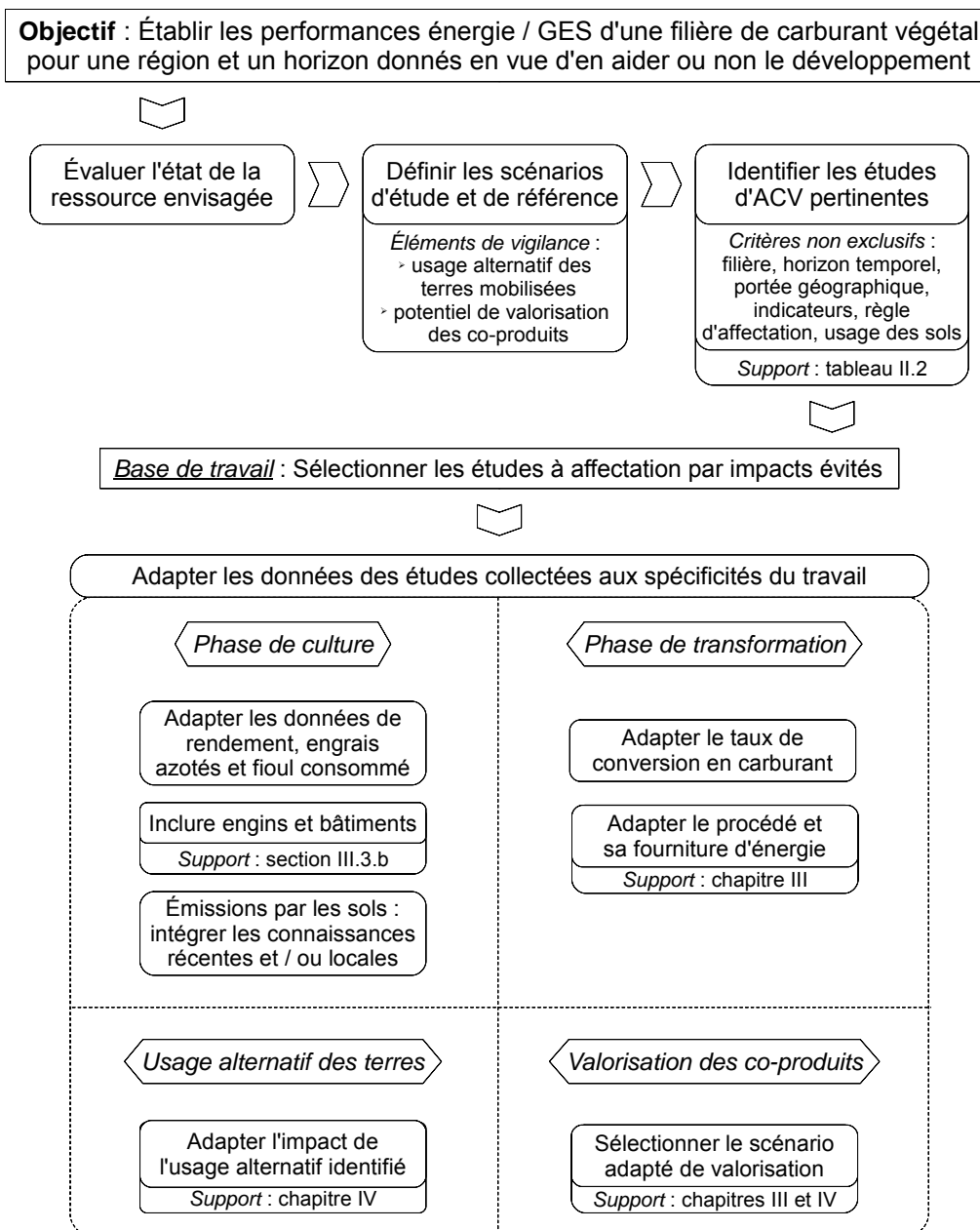


Figure II.12 - Démarche minimale d'exploitation de la bibliographie en vue de répondre à une problématique de cycle de vie des carburants végétaux

Compte tenu des résultats obtenus dans ce chapitre, les étapes décrites à la figure II.12 apparaissent comme les recommandations minimales à appliquer pour obtenir des résultats d'ACV suffisamment pertinents pour juger de l'intérêt, du point de vue de la diminution des consommations énergétiques et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, de la promotion des filières de carburants végétaux. Cette démarche est donc évidemment à adapter si l'objectif de cette aide à la décision est différent, tel que la détermination de l'intérêt d'un élément particulier de la filière ou de leur impact social et / ou économique.

Conclusion

Ce deuxième chapitre a exposé les enjeux relatifs aux carburants végétaux de première génération et l'analyse de leur cycle de vie. Il a permis de comprendre les limites, inhérentes à la photosynthèse, de la biomasse énergie dans son ensemble en tant que voie de conversion de l'énergie solaire, mais aussi de souligner son principal atout, qui tient à la forme chimique du produit de cette conversion, ce qui en fait un vecteur énergétique propice à une utilisation décentralisée telle que la combustion pour le transport.

Dans ce cadre le recours aux carburants végétaux vise notamment à contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de dépendance au pétrole d'un secteur qui en souffre particulièrement ; l'intérêt de l'ACV est alors de quantifier l'avantage que peut procurer ces carburants par comparaison aux références pétrolières, l'essence et le gazole. Or les résultats issus de l'application de l'ACV aux filières de carburants végétaux se sont révélés très divergents. L'analyse globale de la section II a néanmoins permis d'identifier quelques tendances importantes :

- malgré une forte variabilité, les études existantes présentent des résultats d'impact des carburants végétaux globalement plus faibles, même si l'écart est plus marqué pour les émissions de gaz à effet de serre que pour les consommations d'énergie, que ceux des carburants pétroliers, pris à 1,10 MJ / MJ et 85 gCO_{2-éq} / MJ (voir tableau II.5),
- les cultures de canne à sucre et de palmier à huile présentent des bilans particulièrement intéressants pour les filières, respectivement, d'éthanol et d'EMHV, et possèdent plusieurs caractéristiques communes : cultures tropicales bénéficiant d'un ensoleillement important et permettant une productivité par hectare en carburant élevée, cultures pérennes, et phases de de transformation tirant pleinement parti d'un résidu de culture pour assurer l'apport d'énergie, et enfin,
- les filières d'EMHV présentent des impacts dus à la transformation de la matière première en carburant plus faibles que ceux des filières d'éthanol.

La dernière section de ce chapitre a, pour finir, permis d'identifier les paramètres déterminants à l'origine des disparités constatées dans la bibliographie :

- les choix méthodologiques possèdent une forte influence sur les résultats finaux et doivent donc être réalisés de façon pertinente ; en accord avec les enseignements du chapitre I, la méthodologie qui sera appliquée pour le présent travail a été sélectionnée en fonction des objectifs des ACV réalisées et des questions posées : puisque la problématique est de déterminer l'intérêt, du point de vue de la diminution des consommations d'énergie / émissions de GES, de la mise en place de filières de carburants végétaux, la démarche adoptée est consécutive, mettant en œuvre notamment une définition claire et explicite des scénarios comparés et ainsi une affectation par impacts évités,
- la spécificité locale est une composante essentielle de la performance des cultures, qui implique qu'une portée géographique trop large ne pourra traduire que des tendances et non des résultats d'ACV précis,
- l'impact lié à la fabrication et à la maintenance des engins et bâtiments agricoles ne peut être considéré comme négligeable et doit donc être intégré aux cycles de vie étudiés, et enfin,
- les incertitudes liées aux émissions de N₂O par les sols sont un obstacle important à l'établissement d'un bilan précis d'émissions de GES des carburants végétaux, qui nécessite un travail spécifique avant d'être levé et qui, faute de mieux, doit être abordé par une analyse de sensibilité.

Ainsi plusieurs des difficultés relevées ici quant à l'application de l'ACV aux carburants végétaux ont pu trouver des réponses grâce au travail du présent chapitre ou aux connaissances méthodologiques du premier chapitre. Cependant deux des problématiques identifiées nécessitent un travail plus approfondi afin de pouvoir être traitées correctement et feront l'objet des chapitres suivants :

- la phase de transformation de la matière première agricole en carburant s'est révélée être une étape importante des cycles de vie puisque sa part dans les bilans globaux de consommations d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre peut être importante, notamment pour les filières d'éthanol, et qu'elle est un siège essentiel des enjeux relatifs à la valorisation des co-produits des filières, en tant que productrice de tels produits et potentielle consommatrice de ceux de la phase de culture, ce qui est un paramètre décisif quant à la performance environnementale des filières. Parallèlement l'analyse des études a montré que les données relatives à cette phase de transformation n'étaient généralement pas détaillées, ce qui nuit à une étude plus poussée. Le chapitre III visera donc à détailler les procédés existants et d'en déterminer les potentielles améliorations, ainsi qu'à comparer les différentes voies d'utilisation des co-produits et leurs déterminants économiques.
- la définition d'un scénario de référence, servant de base de comparaison pour la détermination de l'intérêt de la promotion de filières de carburants végétaux, est bien souvent lacunaire dans les études existantes. La prise en compte de l'usage alternatif des terres mobilisées a notamment montré un impact potentiellement important sur les résultats finaux bien qu'elle se soit limitée dans les études aux consommations et émissions liées au produit de cet usage alternatif des terres et qu'elle n'ait donc pas intégrée ses conséquences sur les sols en tant que puits de carbone. Le chapitre IV présentera donc le lien entre usage des sols et quantités de carbone stocké dans les sols, et permettra son introduction pertinente dans la pratique de l'ACV.