

Projet BIOMAT

Mise en place d'une méthodologie pour évaluer l'usage de l'eau : application à la production de bioéthanol.

RADENAC Elisabeth

Encadré par :

Alan JEAN-MARIE, chef de projet chez Altran Research et Pascal MAUGIS, chercheur au LSCE

28/08/2015

I. Remerciements

Je remercie en premier lieu Monsieur Fabrice Mariaud et Madame Anne Laure Cadene qui ont permis ce stage.

Je remercie Monsieur Alan JEAN-MARIE et Monsieur Pascal MAUGIS pour leur écoute ainsi que leurs bons conseils qui 'm'ont permis de mener à bien ce stage et d'enrichir mes connaissances

Je tiens à remercier particulièrement Chetna MOHABEER, également stagiaire sur le même projet, avec qui j'ai beaucoup échangé et partagé.

Je salue aussi les collègues du pôle Santé d'Altran Research pour leur convivialité.

II. Présentation de l'entreprise

Altran Technologies est un groupe créée en 1982 et spécialisé dans le conseil en innovation et en ingénierie avancée. Il intervient dans des étapes stratégiques en recherche et développement et en industrialisation dans de nombreux secteurs d'activités tels que l'aéronautique, l'énergie ou l'automobile. Altran est également actif dans des secteurs d'activité liés aux services tels que la finance, les télécoms ou les services informatiques. Avec 23000 employés répartis dans 20 pays à travers le monde en 2014, Altran est une entreprise internationale et son chiffre d'affaire s'élève à 1,756 millions d'euros.

Altran Research est le département de recherche interne d'Altran France créé en janvier 2009 et dirigé par Fabrice Mariaud en sa qualité de directeur des programmes, de l'innovation et des solutions d'Altran France. Son objectif est de renforcer la position du groupe Altran en recherche et innovation ainsi que dans le domaine du conseil en innovation. Son plan d'action de recherche s'articule autour de 6 programmes stratégiques afin d'accompagner le développement d'Altran et surtout, répondre aux enjeux futurs de ses clients.

Ces programmes sont :

- E-Santé (Digital Health) : anticiper, personnaliser et rendre les services de santé plus accessibles.
- Mobilité connectée (Innovative Mobility & Vehicles) : concevoir les véhicules et les infrastructures de transport adaptés aux nouvelles exigences de mobilité des biens et des individus.
- Usine intelligente (Digital Factory) : imaginer les outils, les services, l'architecture et la gestion des données de l'usine du futur.

- Smart Energies (Smart Energy) : optimiser l'utilisation de l'énergie, dans les industries, les bâtiments et tous les réseaux intelligents.
- Machine Driven Big Data (Advanced Analytics) : concevoir les outils pour capter, transférer et analyser les données issues de l'internet des objets.
- Conception augmentée (Enhanced Design) : accélérer et fiabiliser des cycles de conception et de maintenance.

Les projets de recherche de la thématique « Smart Energies » sont divers. Ils passent par l'évaluation de la performance des panneaux photovoltaïques, l'efficacité énergétique des bâtiments, la conception d'un microréacteur nucléaire ou d'un robot pour faciliter le démantèlement des installations à risques ainsi que par des méthodes et outils pour apprécier la valeur durable des filières biosourcées (projet BIOMAT) et de recyclage (projet RPM).

III. Contexte et objectif du projet BIOMAT

Le projet BIOMAT est rattaché au programme Smart Energies d'Altran Research. Ce projet vise à développer des connaissances, des méthodes et des outils qui permettent d'apprécier la valeur durable (impacts environnementaux et sociaux-économiques) des filières de production des produits et matériaux biosourcés, c'est-à-dire élaborés à partir de matière biologique naturelle.

Ce projet s'articule autour de quatre grands axes de recherche innovante :

1. Définir des systèmes pertinents à étudier en fonction du contexte de l'étude, des parties prenantes, etc.
2. Identifier de nouveaux critères de durabilité génériques (les indicateurs de performance) et spécifiques aux filières biosourcées.
3. Développer des modèles et des méthodes pour évaluer les indicateurs sélectionnés.
4. Optimiser des systèmes afin de trouver les meilleurs compromis sur les indicateurs contradictoires.

Dans le cadre de ces recherches, de nouveaux critères autour de la gestion des ressources en eau sont développés. L'objectif consiste à développer une nouvelle méthode d'évaluation de l'usage en eau s'appuyant sur des cas d'étude précis, mais transposable sur divers sujets.

IV. Sommaire

I. Remerciements	2
II. Présentation de l'entreprise	2
III. Contexte et objectif du projet BIOMAT	3
IV. Sommaire	4
V. Introduction	6
1) Contexte de l'étude	6
2) Méthodes existantes et problématiques	6
a. L'analyse du cycle de vie	6
b. La méthode ReCiPe 2008	7
c. Le Système d'Evaluation de la Qualité (SEQ)	9
d. Les indicateurs de l'usage de l'eau dans l'ACV	10
3) Objectifs du stage et présentation du cas d'étude	13
VI. Outils et méthodologies utilisés pour le cas d'étude	14
1) Les zones d'études : les bassins versants de la Drôme et de la Lys	14
2) Les systèmes de cultures : betterave et maïs	15
3) Les systèmes de production du bioéthanol	16
4) L'analyse du cycle de vie	17
VII. Résultats et discussions	17
1) La ressource en eau sur chaque zone d'étude	17
a. Le bassin versant de la Drôme	17
b. Le bassin versant de la Lys	21
2) Les itinéraires techniques de chaque culture	24
a. La culture du maïs	24
b. La culture de la betterave	30
3) Les procédés de production du bioéthanol	36
a. Le procédé de fermentation à partir du maïs	36
b. L'usage de l'eau dans la transformation du maïs en bioéthanol	38
c. Le procédé de fermentation à partir de la betterave	40
d. L'usage de l'eau dans la transformation de la betterave en bioéthanol	42
4) L'analyse du cycle de vie de l'usage de l'eau : élaboration et discussion des trois filières de production	47
a. L'inventaire du cycle de vie	47
b. L'évaluation des impacts environnementaux	48

c. Le bilan de l'usage de l'eau	50
VIII. Conclusion	55
IX. Annexes	58
1) Liste des communes de chaque zone étudiée	58
2) Les connexions entre « midpoints » et « endpoints » dans la méthode ReCiPe 2008	60
3) Les ICV des cultures issus d'EcoInvent	60
4) Les modélisations des procédés industriels	65
5) Les inventaires du cycle de vie pour le maïs et la betterave (procédé direct et procédé indirect)	68
6) Les impacts environnementaux de la filière agricole du maïs et de la betterave (procédé direct et procédé indirect) pour faire 1L de bioéthanol 99,8% via Simapro sur un an.	76
7) Le coût en eau pour la production d'un litre de bioéthanol à partir de maïs ou à partir de betterave (procédé indirect et procédé direct) sur un an.	78
X. Bibliographie	81

V. Introduction

1) Contexte de l'étude

L'eau est considérée à la fois comme un milieu abritant tout un écosystème et une ressource indispensable à l'agriculture, à l'industrie, et bien sûr, à la vie [1]. L'analyse de l'usage de l'eau doit prendre en considération ces deux caractéristiques ; aussi bien les impacts environnementaux que les éventuelles déplétions de l'eau. Sachant que milieu et ressource sont intimement liés, une diminution de la ressource engendre des impacts sur les milieux aquatiques et une détérioration du milieu occasionne une perte de services associés (voire des coûts supplémentaires) de cette ressource (potabilité, propriétés physico-chimiques, pêche, etc.).

La quantification et l'appréciation qualitative de l'usage de l'eau dans une activité humaine sont une priorité afin de protéger et préserver ce milieu et cette ressource, qui sont fragiles et indispensables à la vie.

La difficulté est que l'eau est complexe à étudier. Elle fluctue dans l'espace et le temps. En effet, elle peut être étudiée à des échelles aussi bien locales que globales et généralement, les résultats sont contradictoires d'une échelle à une autre (d'un sous bassin versant à un bassin versant par exemple). Les périodes d'étiage, de crue et les années de sécheresse vont aussi rendre l'analyse de cette ressource plus compliquée. L'évaluation quantitative des nappes et cours d'eau est fluctuante d'une année à une autre mais aussi à des échelles de temps plus courtes. L'évaluation qualitative est généralement basée sur la recherche de polluants liés aux activités anthropiques (agriculture, industrie, ...). Ils sont comptabilisés séparément et leurs impacts (acidification, eutrophisation, écotoxicité, etc.) sont additionnés. Cependant, il est difficile d'analyser les corrélations et les compétitions existantes entre les polluants et ainsi, d'identifier les réels impacts environnementaux sur la faune et la flore.

Certaines méthodes existent et permettent soit de quantifier cette ressource, soit de l'apprécier qualitativement mais rares sont les méthodes répondant aux deux et parmi les existantes, elles demeurent restrictives.

2) Méthodes existantes et problématiques

a. L'analyse du cycle de vie

L'ACV (Analyse du Cycle de vie) est une méthode d'évaluation environnementale normalisée par les normes ISO 14040 et 14044. Elle permet de quantifier les impacts sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit, d'un procédé ou d'un service depuis « le berceau jusqu'à la tombe » [2].

La méthode peut être définie en quatre étapes (Figure 1) :

- I. Définition de l'objectif et du champ d'étude : unité fonctionnelle, périmètre du système, etc.
- II. Inventaire des émissions polluantes et des consommations du système étudié (ICV : Inventaire du Cycle de Vie)
- III. Evaluation des impacts : conversion des données d'inventaires en impacts.
- IV. Interprétation.

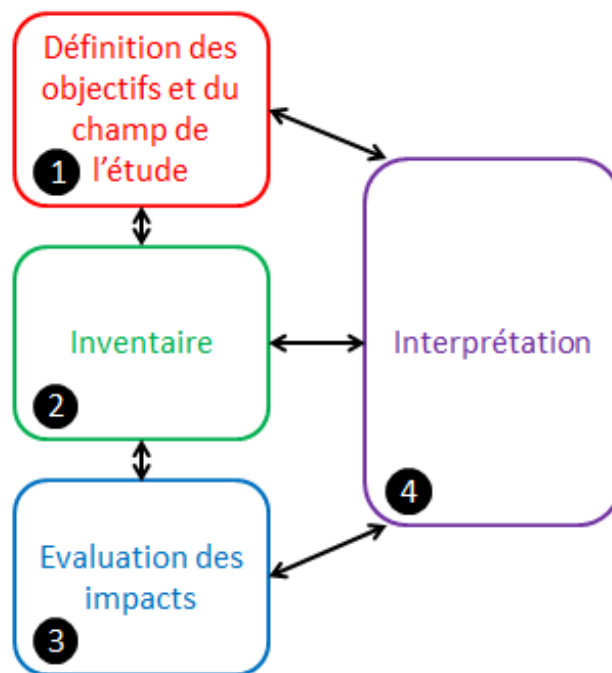


Figure 1 Les quatre étapes d'une ACV [2]

Elle permet d'identifier les causes d'impacts environnementaux d'un système et de les anticiper ou de les éviter. L'ACV est aussi un outil comparatif entre deux systèmes ayant la même unité fonctionnelle (rendant le même service). L'évaluation des impacts est déterminée grâce à des méthodes (exemple ReCiPe 2008) de conversion d'émissions polluantes en effets environnementaux (indicateurs « midpoints ») et dommages potentiels (indicateurs « endpoints »).

b. La méthode ReCiPe 2008

La méthode ReCiPe 2008 est une méthode d'évaluation de l'impact issue du couplage de deux autres méthodes : la méthode « CML 2002 » (indicateurs « midpoints ») et la méthode « Eco-Indicateur 99 » (indicateurs « endpoints ») [3].

Cette méthode convertit l'effet des émissions de substances et d'extraction de ressources naturelles en indicateurs intermédiaires dit « midpoints » (des impacts environnementaux comme par exemple,

l'acidification des océans et le changement climatique). Puis, à partir de cette quantification des effets, les indicateurs « endpoints » estiment les dommages pouvant en résulter en trois aires de protection : la santé humaine, les écosystèmes et les ressources (Figure 2).

Pour passer d'une étape à une autre, des facteurs sont appliqués pour uniformiser les impacts environnementaux en une seule unité qualifiant un « midpoint » puis, pour les traduire en « endpoint ». Ils sont définis par des pondérations comprenant trois scénarii différents :

- Individualiste : scénario à court-terme.
- Hiérarchique : scénario à moyen-terme (le plus commun).
- Egalitaire : scénario à long-terme (grande incertitude).

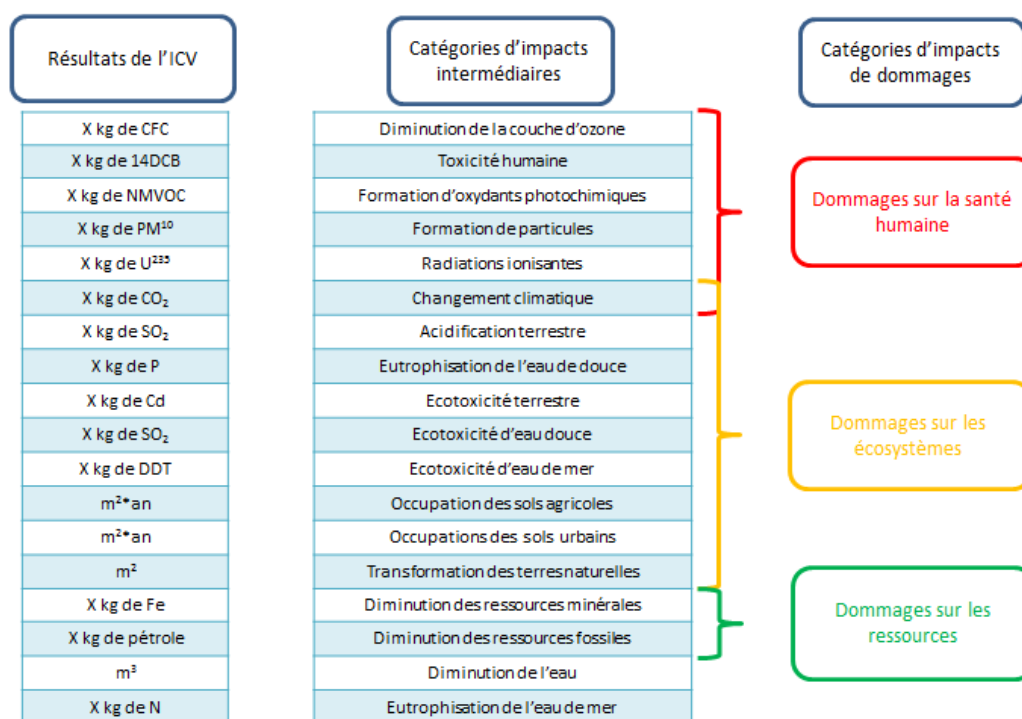


Figure 2 Relations entre les données de l'ICV (Inventaire du Cycle de Vie), les catégories d'impacts intermédiaires et les catégories de dommages dans ReCiPe 2008 [3].

Il faut savoir que certaines connexions entre les « midpoints » et les « endpoints » n'existent pas car elles sont impossibles à modéliser par des facteurs. Par exemple, la diminution d'eau et l'eutrophisation de l'eau de mer restent des « midpoints ». Mais aussi, certains « midpoints » n'ont pas toutes les connexions pour une analyse complète, tels que l'indicateur « occupation des sols agricoles » qui est reliée aux dommages sur les écosystèmes mais pas aux dommages sur les ressources. Les connexions et les non-connexions entre les « midpoints » et « endpoints » sont présentées en annexe 2 Tableau 30.

La méthode ReCiPe 2008 a été choisie pour la réalisation de ce cas d'étude car son principe est simple et qu'un grand nombre d'impacts environnementaux sont répertoriés. De plus, la méthode ReCiPe 2008 est la méthode d'évaluation recommandée pour la plupart des catégories d'impact par le guide de la Commission Européenne [4]. Cependant, l'eau reste peu analysée et quantifiée dans cette méthode. C'est pourquoi nous chercherons à l'améliorer dans le cadre de ce travail.

c. Le Système d'Évaluation de la Qualité (SEQ)

La loi sur l'eau et des milieux aquatiques du 3 janvier 1992, puis du 30 décembre 2006, a amené les agences de l'eau et le ministère chargé de l'environnement à remodeler l'ancien outil d'évaluation de la qualité des rivières françaises (1977) en un système permettant de mettre en évidence plus efficacement les différents types de pollution : le SEQ [5].

Il se décompose en trois volets :

- le « SEQ Eau » évalue la qualité physico-chimique et l'aptitude à favoriser de bonnes conditions de vie, nécessaires aux différents organismes aquatiques,
- Le « SEQ Physique » évalue le degré d'artificialisation (connaissance des conditions hydromorphologiques),
- le « SEQ Bio » évalue la qualité biologique.

Le « SEQ Eau » (qui a été le mieux développé) définit 5 classes de qualité munies d'un code couleur : très bon (bleu), bon (vert), passable (jaune), mauvais (orange) et très mauvais (rouge). Il identifie la nature des perturbations et évalue les incidences sur l'environnement. Avec un échantillon d'eau, plus de 150 paramètres peuvent être analysés et regroupés en 16 altérations (Tableau 1 Description de quelques altérations du SEQ-EAU (* : La méthode de Kjeldahl est une technique de détermination du taux d'azote dans un échantillon) [5]). Il fournit, pour chaque altération, des classes et indices d'aptitude de l'eau à la biologie (l'aptitude à permettre la vie) et des classes d'aptitude de l'eau aux différents usages (production d'eau potable, loisirs, sports aquatiques, irrigation, etc.). L'ensemble fournit les classes et indices de la qualité de l'eau.

Tableau 1 Description de quelques altérations du SEQ-EAU (* : La méthode de Kjeldahl est une technique de détermination du taux d'azote dans un échantillon) [5]

Principe de la SEQ Eau	Altérations	Paramètres mesurés	Effets	Sources principales
	Matière organique et oxydable (MOOX)	Oxygène dissous, Taux de saturation en oxygène, Carbone organique dissous, DBO5 (Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours), DCO (Demande Chimique en Oxygène)	Consommation de l'oxygène de l'eau	Pollution urbaine (zone densément peuplée)
	Température	Température	Perturbation de la vie piscicole	
	Matières azotées, Matières phosphorées	Nitrates (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+), Nitrites (NO_2^-), indice NKJ (Azote Kejdahl)* Phosphates (PO_4^{3-}) et Phosphore total	Prolifération d'algues (eutrophisation) Peuvent être toxiques sous certaines formes (nitrites)	Pollution urbaine, apports d'engrais de l'activité agricole, rejets industriels
	Matières En Suspension (MES)	MES, turbidité	Troublent l'eau, réduit la luminosité Incidences sur la faune et flore	Érosion des sols et rejets domestiques et industriels.
	Micropolluants minéraux et pesticides	Concentrations en métaux lourds + 36 molécules de pesticides	Peuvent être toxiques	Pollution urbaine, agricole ou industrielle

d. Les indicateurs de l'usage de l'eau dans l'ACV

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) a avant tout une approche environnementale de l'eau (acidification, eutrophisation, écotoxicité, etc.), laissant l'aspect « ressource » au second plan. Ci-dessous est présenté deux approches pour la prise en compte de l'eau en tant que ressource dans l'ACV [1].

i. Le développement d'impacts « midpoint » : (Mila i Canals et al. 2009) [6]

L'approche de Milà i Canals et de son équipe propose des indicateurs mesurant les impacts sur l'eau douce : le Freshwater Ecosystem Impact (FEI) et le Freshwater Depletion (FD).

- Le FEI ou l'impact de l'eau douce sur les écosystèmes regroupe trois indicateurs pour décrire la pression sur l'eau à l'échelle d'un pays ou d'un bassin versant.
 - L'indice de stress hydrique développé par Falkenmark et al. (Water Ressource Per Capita, WRPC) : c'est une comparaison entre le besoin en eau par habitant et la quantité de ressources renouvelables en eau (souterraine et superficielle). Le besoin

en eau est une référence calculée en prenant un pays développé sous un climat semi-aride. En comparant, si la quantité de ressources renouvelables est en dessous de 1700m³/habitant/an, ceci indique un stress hydrique. En dessous de 1000 m³/habitant/an, ceci indique une pénurie d'eau et en dessous de 500 m³/habitant/an, ceci indique une pénurie sérieuse [6].

2. L'indice de l'usage de l'eau par ressource développé par Raskin et al. (Water Use Per Resource, WUPR) : c'est le ratio entre les quantités d'eau utilisées et les ressources disponibles en eau. Le ratio obtenu détermine l'eau disponible pour l'écosystème (milieux aquatique). Elevé, le ratio indique un sérieux stress hydrique sur le milieu car l'eau disponible a été en majorité utilisée pour l'activité humaine.
 3. L'indice de stress hydrique développé par Smakhtin et al. (Water Stress Indicator, WSI) est le ratio de la quantité d'eau prélevée pour les usages humains sur la ressource renouvelable en eau où l'eau requise pour les écosystèmes est déjà déduite.
- Le FD ou l'épuisement de la ressource en eau douce caractérise la rareté des ressources en eau souterraine. En s'appuyant sur l'« Abiotic Depletion Potential » (ADP) de Guinée et Heijungs, Mila i Canals présente une formule adaptée de l'ADP avec l'idée de régénération de l'eau comme pour le « Biotic Depletion Potential ». Il faut noter que Guinée et Heijungs ont écarté l'eau de leur approche car elle est une ressource « fluctuante ».

$$ADP_i = \frac{ER_i - RR_i}{(R_i)^2} \times \frac{(R_{sb})^2}{DR_{sb}}$$

ER_i : taux d'extraction de la ressource *i*

RR_i : taux de régénération de la ressource *i*

R_i : réserve de la ressource *i*

R_{sb} : réserve de la ressource de référence (Sb, Antimoine)

DR_{sb} : « désaccumulation » (production-régénération) de la ressource de référence (Sb Antimoine)

ii. Le développement d'indicateurs « endpoint » : (Pfister et al. 2009) [7]

L'équipe a travaillé sur les trois aires de protection suivantes : la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources :

- L'indice de stress hydrique (WSI, Water Stress Index) qui indique la part de l'eau prélevée pour un usage, libérant un rejet éventuellement réutilisable en aval. Ceci est plus vu comme un facteur de caractérisation pour une catégorie d'impact « midpoint » (« perte en eau »). Il

est calculé grâce à la valeur du stress hydrique (rapport du total de l'eau prélevée pendant un an sur la disponibilité hydrologique) en tenant compte des précipitations annuelles et mensuelles et des ouvrages présents (retenues d'eau, réserves, barrages).

- Les dommages sur la santé sont déterminés par l'impact d'une faible disponibilité en eau sur la malnutrition à travers une agriculture peu productive faute d'irrigation.
- Les dommages sur la qualité des écosystèmes (EQ) sont exprimés en PDF (Potentiel de Disparition des Espèces par an) afin de transposer l'effet de la consommation d'eau sur l'écosystème. La démarche est la suivante : la valeur du PDF est égale à la valeur de la vulnérabilité de la biodiversité des espèces de plantes vascularisées qui elle-même, est désignée comme étant la production primaire nette (NPP, c'est-à-dire la quantité de carbone captée et stockée par les plantes lors de la photosynthèse). La fraction de NPP représente la vulnérabilité d'un écosystème face à un manque d'eau et est utilisée comme une approximation du PDF. En effet, un manque d'eau chez une plante non grasse (cactus) entraîne la fermeture des stomates (afin de diminuer la transpiration de la plante) et en conséquence, une diminution de la production de matière (le CO₂, essentiel à la photosynthèse, n'est plus capté par ces mêmes stomates).
- Les dommages aux ressources sont quantifiés par le fait que l'épuisement des ressources peut être dû à l'extraction d'eau fossile ou à une surexploitation des masses d'eau. Le dommage est traduit en énergie nécessaire pour extraire un mètre cube d'eau supplémentaire. La technologie employée dans ce cas est la technique du dessalement de l'eau de mer.

$$\Delta R = E_{\text{désalinisation}} \times F_{\text{déplétion}} \times WU_{\text{consommée}}$$

$E_{\text{désalinisation}}$: énergie nécessaire pour la désalinisation de l'eau de mer (MJ/m³)

$F_{\text{déplétion}}$: fraction d'eau douce consommée qui contribue à l'épuisement de la ressource

$WU_{\text{consommée}}$: quantité d'eau prélevée par l'activité humaine

Cet indicateur n'est pas satisfaisant car il n'interprète pas les doubles-comptes associés à une réutilisation de l'eau après retour des rejets à la ressource (très importants pour les usages industriels, énergétiques et domestiques).

iii. L'indicateur WEI+ [8]

Le « Water Exploitation Index Plus » est un indicateur mesurant la pression de l'activité humaine sur la ressource en eau pour un territoire donné. Il se calcule en faisant la soustraction entre les sorties (volume prélevé) et les retours (volume rejeté) d'une activité humaine, le tout divisé par la

disponibilité de la ressource en eau douce renouvelable. Il représente l'exploitation réelle en eau et ses effets sur le stress hydrique.

3) Objectifs du stage et présentation du cas d'étude

Le but de ce stage est de coupler des méthodes et outils afin de créer une méthodologie pour analyser l'usage de l'eau. Afin d'y parvenir, nous nous appuierons sur un cas d'étude où l'usage de l'eau est fort : la production de bioéthanol à partir de maïs ou de betterave sucrière. Ainsi avec ce sujet, nous aborderons l'eau dans la filière agricole et industrielle.

Le cas d'étude se fait dans deux bassins versants français différents : le bassin de la Drôme pour le maïs (département 26) et le bassin de la Lys pour la betterave sucrière (départements 59 et 62).

Le travail est découpé en plusieurs parties :

- Le bilan de la ressource en eau dans les deux bassins versants.
- Les pratiques culturales du maïs et de la betterave dans chaque bassin versant.
- Le procédé de fabrication du bioéthanol à partir de betterave ou de maïs.
- L'ICV (inventaire du cycle de vie) de l'eau : de la matière première jusqu'à l'élaboration du bioéthanol.
- L'élaboration d'un outil d'aide à la prise de décision et l'ACV du cas d'étude.

Actuellement, il n'existe pas de méthode d'évaluation du caractère durable de la ressource en eau dans la filière bioéthanol. C'est pourquoi, ce stage se base sur une méthodologie déjà existante (ReCiPe 2008) avec pour objectif de l'améliorer, afin d'analyser et d'évaluer les impacts potentiels aussi bien sur la quantité que sur la qualité de la ressource en eau.

L'analyse du cycle de vie se présente en un système : de la production de la matière première (betterave sucrière, maïs) à la fabrication de bioéthanol à 99,8%. Ce système est étudié en deux sous parties : l'empreinte eau générée par la culture et l'empreinte eau générée par le procédé de fabrication du bioéthanol. L'unité fonctionnelle sera le litre de bioéthanol à 99,8%.

L'échelle de temps est faite sur une année découpée en mois. Les données collectées sont datées généralement de 2007 afin de prendre en compte une année sèche. L'année 2003, un temps envisagé n'a finalement pas été retenue car il s'agit d'une année de sécheresse exceptionnelle.

La Figure 3 [9] représente les entrées et sorties d'eau dans le système étudié avec une dimension aussi bien quantitative que qualitative. Le transport n'est pas analysé car il a été fait l'hypothèse que la présence et l'usage de l'eau y est négligeable au regard du système à étudier.

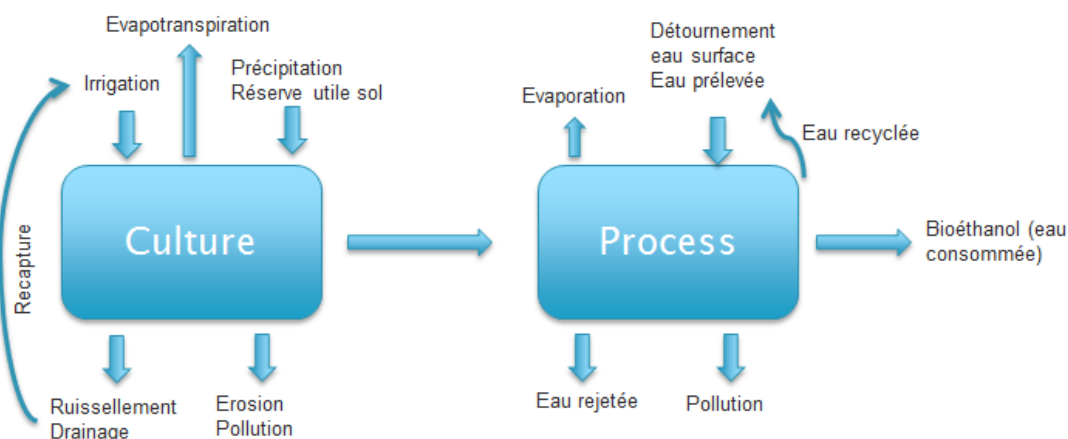


Figure 3 Schéma de l'analyse du cycle de vie de la ressource en eau lors de la production de bioéthanol [9]

VI. Outils et méthodologies utilisés pour le cas d'étude

1) Les zones d'études : les bassins versants de la Drôme et de la Lys

Les zones étudiées ont été prédéfinies au commencement de ce travail. Le but était de pouvoir comparer deux zones contrastées et symptomatiques : les bassins versants de la Drôme et de la Lys.

La description et l'analyse de ces deux bassins requièrent une connaissance précise sur :

- la géographie,
- l'hydrographie,
- les communes qui les composent afin de déterminer les prélèvements en eau,
- la localisation des cultures,
- la pluviométrie,
- les débits des cours d'eau,
- le renouvellement et la localisation des nappes.

La vision spatiale et temporelle est importante afin de pouvoir tenir compte des synergies entre la zone d'étude, la pratique culturale et le procédé de fabrication du bioéthanol.

Pour obtenir ces informations, il a fallu corréler différentes sources :

- Les S.A.G.E (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) déclinent à l'échelle d'un bassin versant les grandes priorités données par le S.D.A.G.E (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux mettant en principe, la loi sur l'eau de 1992) et sont discutés au d'une CLE (Commission Locale sur l'Eau), comprenant des représentants de l'Etat,

des collectivités locales et des usagers. Ils énoncent des priorités sur le bassin versant comme la protection du milieu aquatique, l'équilibre entre les différents usages de la ressource, environnement urbain et rural ou les contraintes économiques. Grâce aux rapports du S.A.G.E, il est possible d'obtenir de nombreuses informations sur le bassin versant : la quantité, la qualité et l'utilisation de la ressource [10].

- Les agences de l'eau : Elles font parties de la CLE et peuvent renseigner sur les prélèvements effectués sur le bassin.
- Le Syndicat Mixte Rivière Drôme & ses affluents : Il fait aussi partie de la CLE de la Drôme. Leur site internet est très bien documenté sur l'état de la ressource sur le bassin de la Drôme [11].
- DRAAF : (Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt) elle assure la gestion du monde rural, les relations entre les différents partenaires régionaux et met en place les politiques arrêtées par le gouvernement et mises en œuvre par le ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt [11].
- Météo France : Les données des stations météorologiques sont disponibles sur leur site (la pluviométrie).
- La banque HYDRO est une base de données qui fournit des mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) en provenance d'environ 5000 stations implantées sur les cours d'eau français et permet un accès aux données signalétiques des stations (finalité, localisation précise, qualité des mesures, historique, données disponibles, etc.). HYDRO calcule sur une station donnée, les débits instantanés, journaliers et mensuels [13].
- D'autres sources bibliographiques : pour comparer et compléter les informations

2) Les systèmes de cultures : betterave et maïs

L'un des objectifs de ce travail est de présenter un itinéraire technique spécifique à la zone d'étude afin de préciser les usages de l'eau dans la culture du maïs et de la betterave et sur les impacts environnementaux liés à la filière agricole.

L'itinéraire contient les semences, l'irrigation, les pesticides, les fertilisants et les rendements répartis sur l'année. Les impacts que nous comptabilisons sont des impacts issus de l'azote, du phosphore, du potassium et des matières actives des pesticides.

Pour déterminer les émissions polluantes, nous avons utilisé l'approche suivante : un pourcentage massique de la substance épandue.

L'itinéraire provient de diverses sources et organismes dont :

- Les chambres d'agriculture : ce sont des organismes consulaires départementaux chargés de représenter tous les agents économiques de l'agriculture et d'accompagner les agriculteurs pour le développement de leur exploitation [14, 15].
- Les statistiques agricoles et l'Agreste : Le ministère de l'agriculture fait chaque année des bilans et des statistiques agricoles du monde rural, des productions aux caractéristiques socio-économiques de la filière par région, département voire même par commune (pour le recensement agricole) [19-24].
- L'ITB : l'Institut Technique de la Betterave est une association interprofessionnelle, de différents acteurs du secteur de la betterave industrielle tels que des cultivateurs de betteraves et industriels produisant du sucre, de l'alcool et du bioéthanol. L'objectif de l'ITB est d'orienter et de coordonner tout ce qui peut augmenter les performances économiques de la culture de la betterave et améliorer son utilisation industrielle dans le respect de l'environnement [16-18].
- EcolInvent : Base de données suisse qui fournit l'ICV (Inventaire du Cycle de Vie) de nombreux procédés industriels et agricoles fournissant des données quantitatives des entrées et sorties des processus pour être ensuite analysées par des outils ACV comme Simapro (voir définition dans le point 4 : l'analyse du cycle de vie). Ces ICV sont basés sur divers types de sources : de données provenant de l'industrie à une modélisation ou à une expérimentation.
- Agribalyse : Base de données d'ICV de l'ADEME (137 Inventaires de Cycle de Vie de produits agricoles animaux et végétaux) pour faciliter l'analyse des filières et de leurs impacts environnementaux [25].
- Météo France : Les données des stations météorologiques sont disponibles sur leur site (l'évapotranspiration potentielle par décade).
- D'autres sources bibliographiques : pour comparer et compléter les informations.

3) Les systèmes de production du bioéthanol

Il n'existe pas d'usine de production de bioéthanol en Drôme. Afin d'étudier la fabrication du bioéthanol à partir de maïs grain en Drôme, le choix de transposer les procédés et rendements de l'usine Abengoa Bioenergy France [28] à Mont dans les Pyrénées-Atlantiques a été fait.

Pour la zone d'étude de la Lys, l'usine TEREOS à Lillers [55] dans le Pas-de-Calais est tout indiquée pour servir de base à cette étude puisque c'est une sucrerie-distillerie.

L'intérêt est de déterminer la quantité d'eau utilisée dans l'industrie pour les procédés de fabrication du bioéthanol soit avec du maïs, soit avec de la betterave sucrière. Pour cela, il faut rechercher toutes les entrées et sorties du système « Process » présenté figure 1. De plus, cette étude doit

prendre en compte la ressource disponible pour cette activité et son impact environnemental. C'est pourquoi l'aspect qualitatif des sorties d'usines est prise en compte.

La base de données Ecoinvent est utilisée pour donner un ordre de grandeur et un comparatif, aussi bien pour le maïs que pour la betterave.

Les données issues des procédés sont difficiles à obtenir auprès des industriels. Pour la betterave, grâce à un article scientifique [59], nous avons pu reconstituer un procédé de fabrication du bioéthanol à partir des mélasses (valorisation des déchets de la sucrerie). A l'aide de ce procédé, nous avons aussi déterminé un procédé permettant d'obtenir le bioéthanol directement à partir du saccharose de la betterave. Pour le maïs, nous avons utilisé des rapports américains afin de déterminer l'eau consommée dans le procédé [49].

Des organismes comme le IREP (Registre Français des Emissions Polluantes) [26] et les ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) [27] ont permis de prendre connaissance des arrêtés appliqués pour ces deux usines (TEREOS Lillers et Abengoa Bioenergy France), des prélèvements effectués de la ressource en eau et de leurs rejets.

4) L'analyse du cycle de vie

Un bilan eau est effectuée afin de déterminer le coût en eau de la production d'un litre de bioéthanol à partir de betterave sucrière ou de maïs : de la culture à la production du bioéthanol. Les impacts environnementaux découlent des rejets et des émissions de polluants de la culture et du procédé.

Pour cela, nous avons utilisé le logiciel Simapro 7 qui est un outil permettant de réaliser des analyses de cycle de vie en collectant des données entrantes et sortantes d'un système étudié, et en analysant ces données, d'exprimer la performance environnementale du système.

VII. Résultats et discussions

1) La ressource en eau sur chaque zone d'étude

a. Le bassin versant de la Drôme

Le bassin versant de la Drôme est situé dans le département de la Drôme (26) au Sud-Est de la France (Figure 4). Il couvre une superficie de 1 640 km² sur un relief de moyenne montagne (point culminant à 2041 m) et regroupe 91 communes plus ou moins intégrées au bassin.

La Drôme, affluent du Rhône, traverse ce bassin sur 106,5 km en passant par les versants montagneux du Vercors jusqu'à la plaine du Rhône. Les principaux affluents de la Drôme sont le Bèz,

la Sure, la Gervanne et la Sye. Ces cours d'eau, karstiques, sont alimentés par les neiges du Vercors. Le régime hydrologique de la Drôme est dit de type préalpin à influence subméditerranéenne. Ce régime est caractérisé par de basses eaux en hiver, de très basses eaux en été et un écoulement maximal au printemps dû à la fonte des neiges du Vercors donnant lieu à de fortes crues.

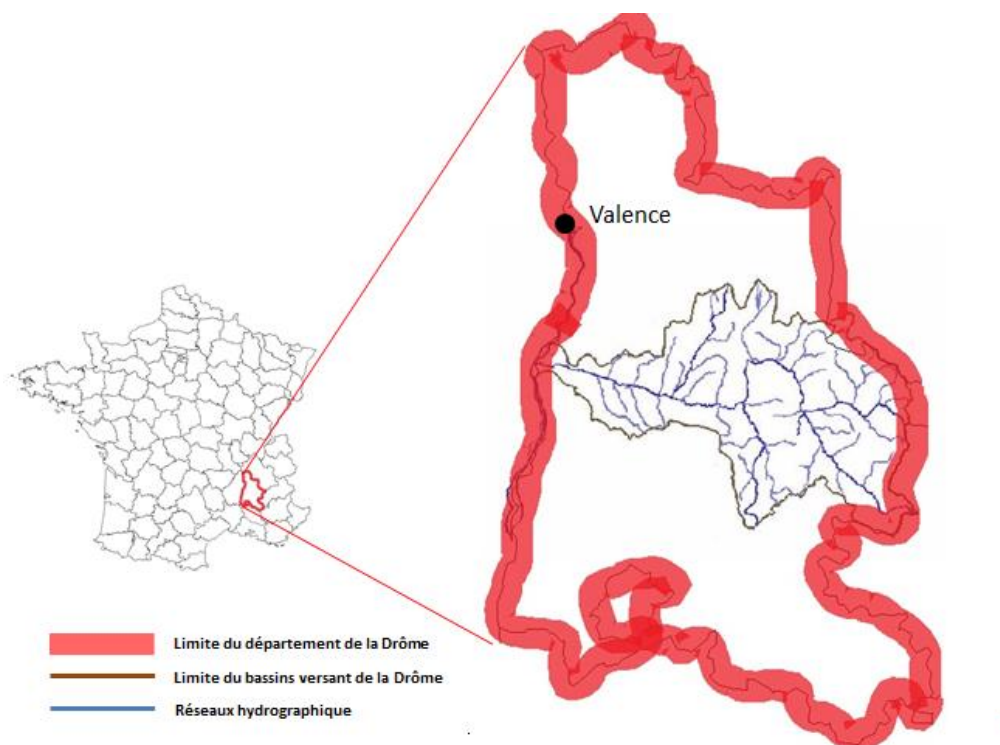


Figure 4 Localisation du bassin de la Drôme en France [carte réalisée sur la logiciel MapInfo]

Il s'agit d'un bassin essentiellement rural, couvert de forêts et de prairies sur les hauteurs, et aux fonds de vallées occupés par des cultures. Les cultures irriguées occupent l'essentiel des surfaces à l'extrémité aval du bassin. Les principales zones urbaines se trouvent en fond de vallée, surtout dans la basse vallée du Rhône.

La culture du maïs dans ce bassin y est bien implantée et majoritairement irriguée. Le maïs grain, semence et fourrage sont bien représentés et localisés différemment dans le paysage.

Le maïs grain, matière première pour la fabrication du bioéthanol dans cette étude, est situé à l'aval du bassin (100% de la SAU (Surface Agricole Utile) en maïs grain cf. Figure 6) et est irrigué à plus de 92% de sa SAU (Figure 5).

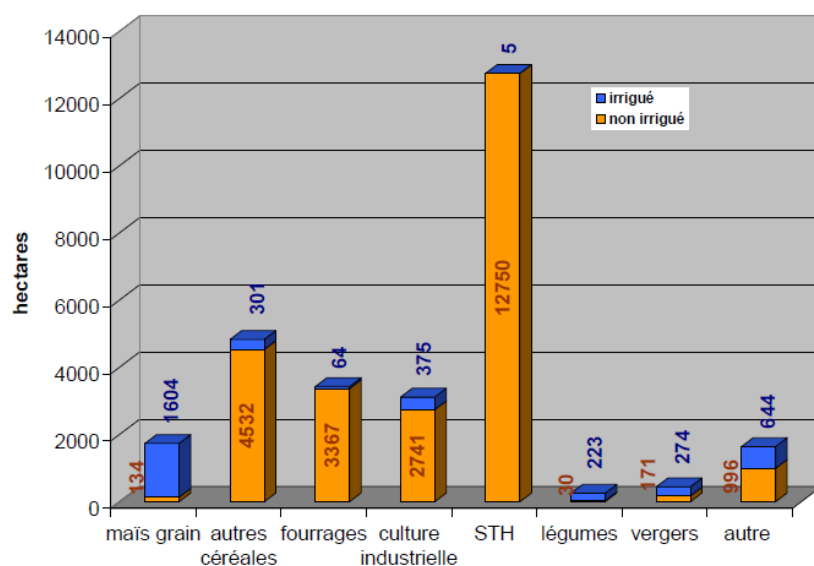


Figure 5 Proportion de surfaces irriguées sur le bassin pour chacun des différents assolements. [11]

D'après ces données, la zone d'étude sera restreinte à l'aval du bassin versant à l'Est de la ville de Saillans (Annexe 1 Tableau 29 : liste des communes de la zone étudiée), servant de point référence pour la pluviométrie du bassin et le débit de la Drôme. Ceci permettra d'homogénéiser cette région qui du faite de sa topographie et de son réseau hydrographique, complexifie son analyse et sa description. La Figure 6 explique le choix de Saillans comme ville référence, elle est à la frontière entre l'amont et l'aval du bassin et est situé au début du fond de vallée, lieu où le maïs grain est produit.

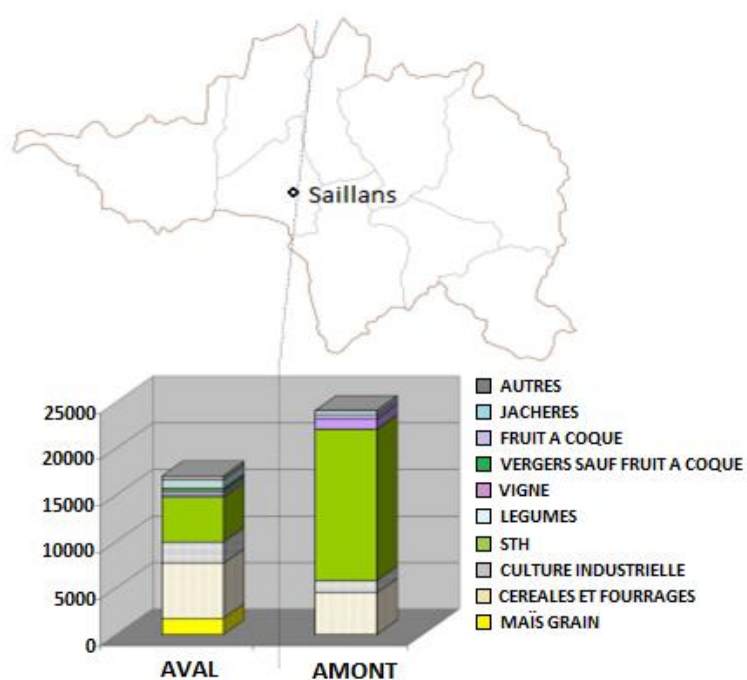


Figure 6 Répartition des surfaces cultivées sur le bassin de la Drôme entre l'amont et l'aval du bassin - Données du RA 2000 (le maïs grain est représenté en jaune). [11]

La pluviométrie et le débit de la Drôme à Saillans en 2007 sont donnés dans le Tableau 2.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pluviométrie (mm)	46,5	45,7	58,6	52,1	111,1	115,5	33,9	37,3	52,1	5,4	114,6	32,2
Débit (m³/s)	6,74	12,2	15,7	15,5	14,5	20,20	4,36	2,48	2,66	2,38	7,56	9,83

Tableau 2 Pluviométrie en 2007 et débit de la Drôme à la station de Saillans en 2007 (Code station V4264010) [11] [13]

La plaine d'Allex, où la culture de maïs grain est la plus concentrée (ainsi que les cultures de maïs semence), est caractérisée par une réserve utile de 40 mm et une valeur moyenne d'infiltration de 375 mm/an en considérant un ruissellement superficiel nul (calculée sur la période 1997-2009) [11], les eaux de pluies étant rapidement capturées par le sol fissuré puis acheminé vers les résurgences. Il est fait l'hypothèse que sur toutes les cultures de maïs grain, ces valeurs soient semblables afin de faciliter l'analyse de la zone étudiée.

Les prélèvements effectués dans la zone étudiée en 2007 et l'origine des prélèvements des différents types d'irrigation dans la même zone en 2007 sont représentés en Figure 7 et Figure 8 respectivement (l'alimentation des canaux n'est pas prise en compte dans le bilan).

L'irrigation dans l'aval du bassin est l'activité la plus utilisatrice d'eau. Le volume total dédié à l'irrigation est de 7.750.800 m³ (60% sur l'ensemble des prélèvements de la zone étudiée) dont 67% uniquement pour l'aspersion (le plus souvent par jet horizontal), technique la plus utilisée pour l'irrigation du maïs à cette époque. L'aspersion verticale descendante est un système plus efficace mais plus récent.

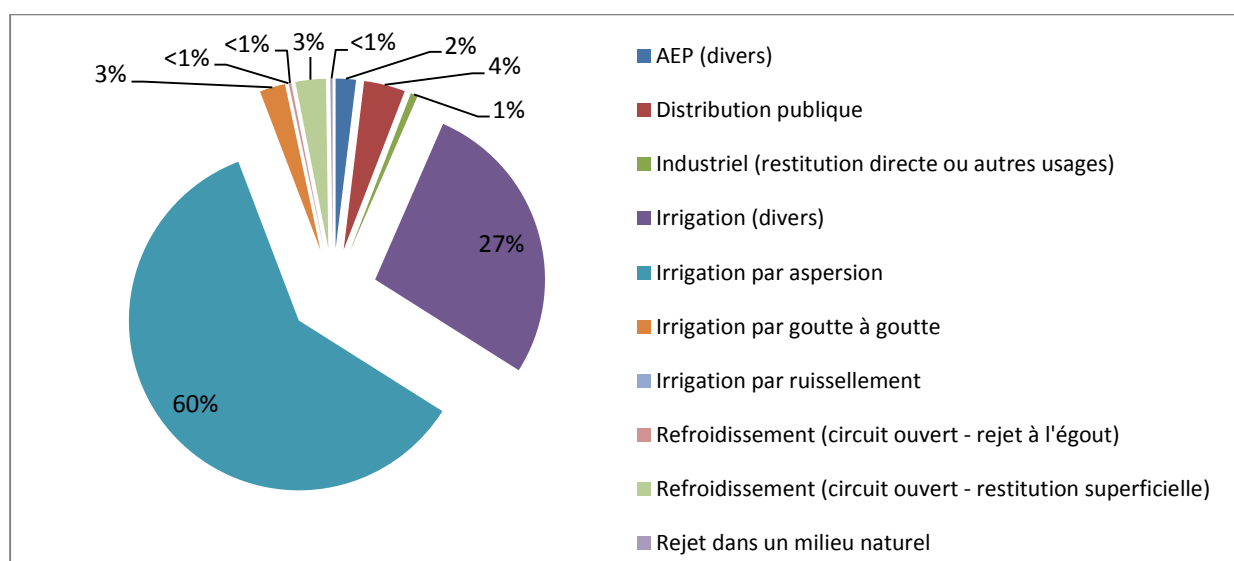


Figure 7 Répartition en pourcentage du volume total prélevé en 2007 (8.601.770 m³) dans l'aval du bassin de la Drôme [11]

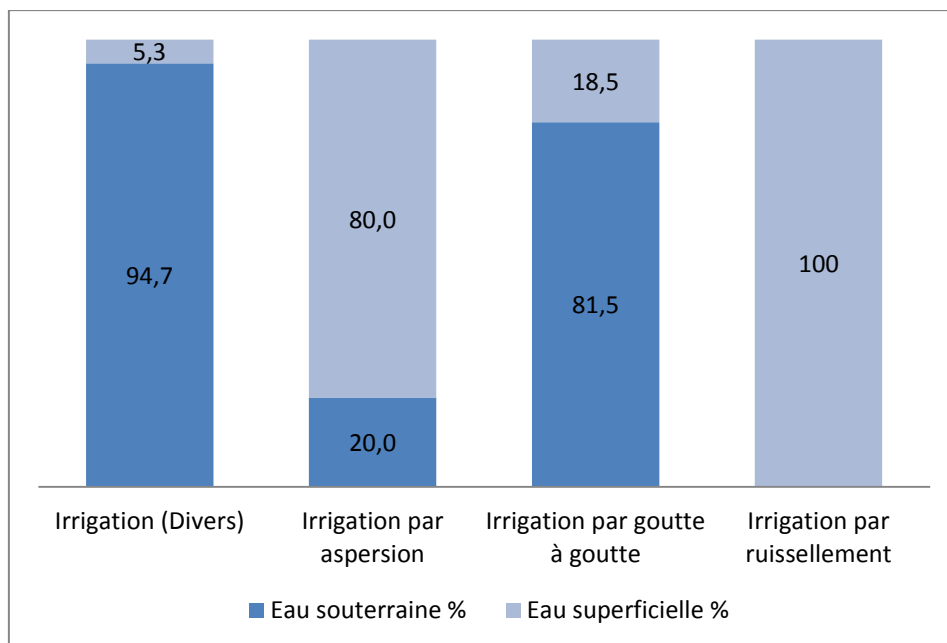


Figure 8 Lieu de prélèvement des différents types d'irrigation en 2007 (7750,8m³) [11]

Pour l'aspersion, la ressource en eau la plus utilisée est l'eau superficielle (80%). Ainsi, pour la culture du maïs grain, l'irrigation sera par aspersion et issue de l'eau superficielle.

b. Le bassin versant de la Lys

Le bassin de la Lys se situe dans la région Nord-Pas-de-Calais à proximité de la frontière belge (Figure 9).

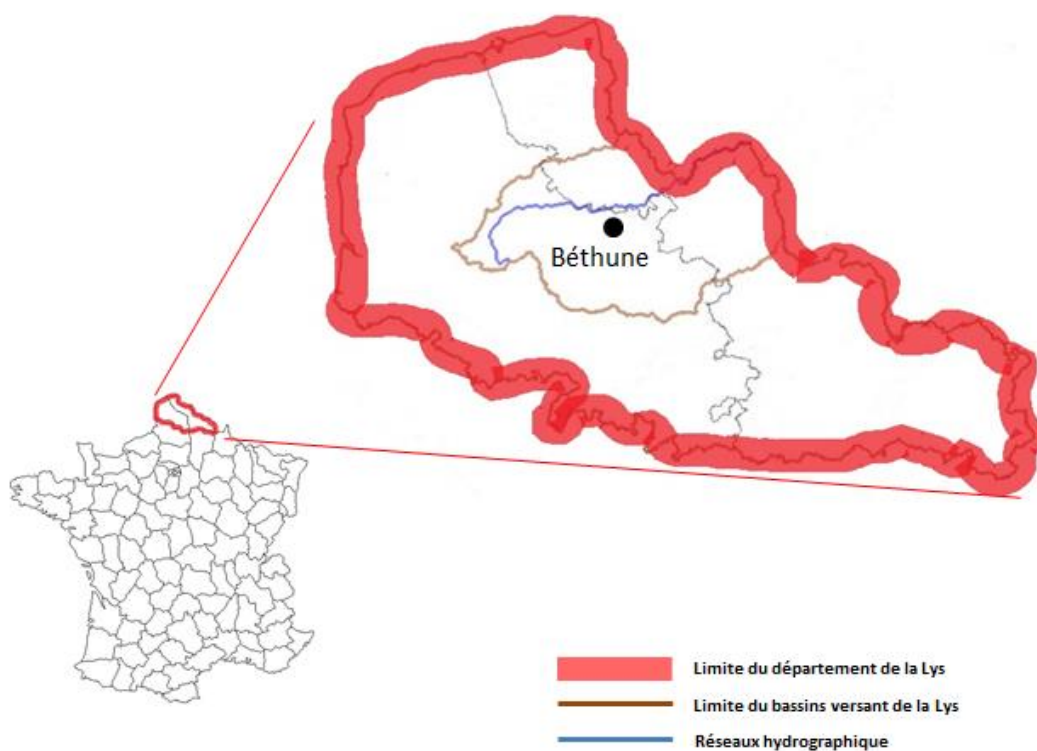


Figure 9 Localisation du bassin de la Lys en France [carte réalisée sur le logiciel MapInfo]

La zone étudiée ne sera pas le bassin versant en entier pour des raisons d'accessibilité des données et du fait que le SAGE relatif à la Lys a une autre délimitation que le bassin versant, présentée sur la Figure 10. L'étude reprendra donc la même zone étudiée [10].

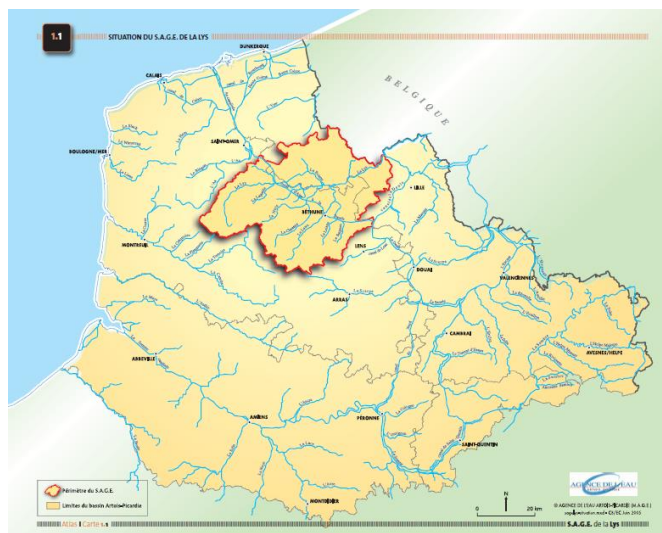


Figure 10 Périmètre du SAGE de la Lys (en rouge) [10]

Il regroupe 225 communes (Annexe 1 Tableau 28 : liste des communes) dont 175 sont dans le département du Pas-de-Calais et 50 dans le département du Nord. Sa superficie est de 1834 km². La Lys prend sa source à Lisbourg (115 m d'altitude) dans les collines de l'Artois, parcourt près de 85km en France, matérialise sur 25 km la frontière franco-belge et se jette dans l'Escaut à Gand (4,5m d'altitude), après un parcours de 88 km en Belgique. Le climat est dit océanique tempéré, avec des précipitations allant de 640 à 1000 mm/an (760 mm/an en moyenne).

La ressource souterraine est constituée majoritairement de deux masses d'eau : la Craie de l'Artois de la vallée de la Lys (faisant partie de la nappe de la Craie Séno-Turonienne) et les sables du Landénien des Flandres (respectivement en beige et en pointillé sur la carte Figure 11). La première constitue la principale réserve en eau souterraine du bassin de la Lys.

- La nappe de la craie a sa surface de réalimentation au sud du bassin (craie du Cénomanien, Turonien et Sénonien) et s'étend sur 763 km². Au Nord, elle est captive sous les Argiles de Louvil. Les infiltrations effectives à la nappe représentent 17 % des pluies annuelles (soit 131mm/an [29]). La recharge effective de la nappe (infiltrations – prélèvements) représente en moyenne 7 % des pluies annuelles, ce qui équivaut à une recharge moyenne annuelle de 47 millions de m³/an [10].

- La surface de réalimentation de la nappe des sables landéniens s'étend sur 233 km². Les infiltrations à la nappe représentent 112 mm/an.

La ressource superficielle est particulièrement dense dans sa partie nord-est. Il se compose de nombreux petits cours d'eau et canaux. La partie sud au contraire présente un réseau hydrographique moins dense caractérisé par des rivières plus encaissées dans les formations rocheuses, et où à partir d'Aire-sur-la-Lys, la Lys est canalisée.

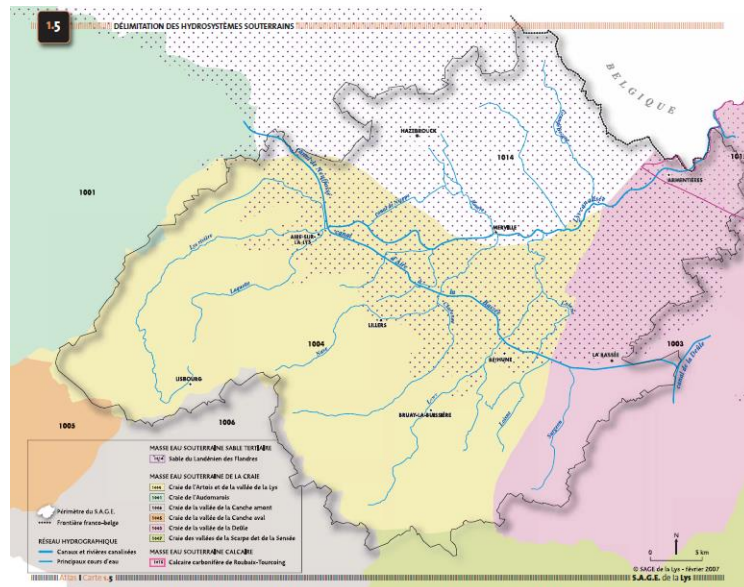


Figure 11 Hydrosystèmes souterrains et superficiels du S.A.G.E de la Lys

La ville de Lillers est prise comme point de référence pour la pluviométrie et le débit (débit de la Nave) car l'usine de production de bioéthanol y est implantée (usine TEREOS de Lillers). La pluviométrie et le débit de la Nave à Lillers en 2007 sont présentés dans le Tableau 3. Il n'existe pas de station pluviométrique à Lillers pour obtenir la pluviométrie ; une moyenne sur 6 stations (Borre, Doulieu, Aire-sur-la-Lys, Bruay-en-Artois, Herbelles, Ourton) se trouvant sur la zone étudiée a été faite. Pour le débit, il n'y a pas de mesure de la Nave sur la banque HYDRO (rivière traversant Lillers). Ainsi, c'est le débit de la Clarence qui est mesuré car la Nave en est un affluent. La station utilisée dans la Banque Hydro est celle de Robecq (Code station E3646210).

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Pluviométrie (mm)	83,15	90,30	73,97	2,27	80,33	130,98	158,17	71,33	60,73	48,30	54,20	75,78
Débit (m ³ /s)	1,99	2,07	2,53	1,18	1,09	1,7	1,67	1,05	1,25	1,31	1,04	1,99

Tableau 3 Pluviométrie et débit de la Nave à la station de Lillers en 2007 [13] [30]

L'irrigation est l'usage le moins consommateur d'eau après les loisirs dans la région étudiée avec 1% des prélèvements (soit environ 55 491 108 m³) (voir Figure 12). Par contre, les prélèvements sont aussi bien effectués dans les eaux superficielles que dans les eaux souterraines (voir Figure 13).

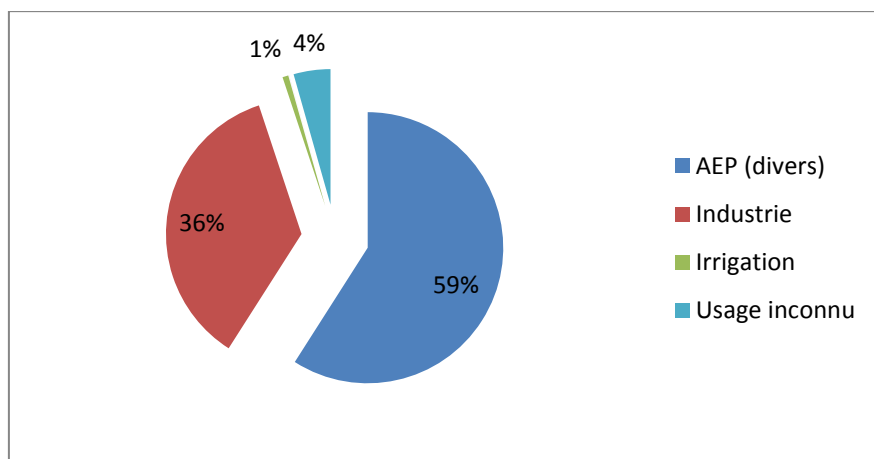


Figure 12 Répartition en pourcentage du volume total prélevé en 2007 (73.988.144 m³) [prélèvements obtenus directement auprès de l'Agence de l'eau Artois Picardie]

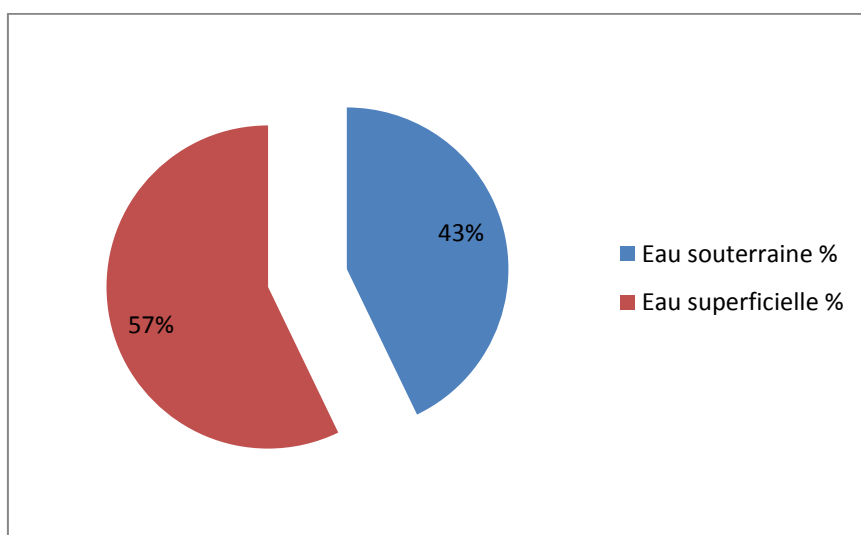


Figure 13 Répartition de l'irrigation entre les eaux superficielles et souterraines dans la zone étudiée en 2007 (521989 m³) [prélèvements obtenus directement auprès de l'Agence de l'eau Artois Picardie]

2) Les itinéraires techniques de chaque culture

a. La culture du maïs

Le maïs est une plante tropicale qui apprécie les climats chauds, des sols (limons sablonneux de préférence) profonds bien structurés et riche en éléments nutritifs. Le maïs exige une importante quantité totale d'eau et surtout dans les périodes de l'année où elle se fait rare (période d'été). Mais le maïs utilise cette eau de manière efficace : 350 g d'eau pour produire 1 g de matière sèche

(EUE : coefficient d'efficience d'utilisation de l'eau) contrairement à la betterave qui est de 380 g H₂O/g MS (Ms : matière sèche), 500 g H₂O/g MS pour le blé et 570 g H₂O/g MS pour la tomate [31].

Le rendement en maïs grain récolté à 35% d'eau (taux d'humidité conventionnel pour la récolte du maïs grain) en 2007 est de 11,4 tonnes/ha [23]. Ainsi la quantité totale d'eau pour une année se calcule d'après l'équation :

$$BESOIN\ EAU\ DU\ MAÏS = Rendement(1 - Humidité\ du\ grain) \times EUE$$

$$BEM = 11,4(1 - 0,35) \times 350$$

$$BEM = 2600\ m^3/ha$$

Dans une étude sur le bassin de la Drôme, la consommation d'eau pour le maïs grain est comprise entre 2400 et 3800 m³/ha en fonction du type d'année (sec, humide, moyen) avec un objectif de rendement de 125 qx/ha [31]. En ramenant le rendement à 114 qx/ha, la fourchette est de 2200 à 3470 m³/ha.

D'après le registre agricole de 2000, la SAU du maïs grain dans la zone étudiée est de 1738 ha dont 1604 irrigués [EVP]. Pour la suite de l'étude, le maïs grain est dit systématiquement irrigué et la méthode d'irrigation est fixée à celle de l'aspersion. L'intégralité de la SAU sera consacrée à la production de bioéthanol.

L'irrigation du maïs s'effectue pendant la période d'étiage en Drôme, c'est-à-dire du mois de juin jusqu'à août, à raison de 35 mm par semaine soit 140 mm. Ceci correspond donc 4200 m³/ha mais il faut prendre en compte environ 15% de pertes dus à l'évaporation directe et à la dérive par le vent dans le système aspersion horizontal retenu ici [11, 33], ainsi que l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration maximale est la perte en eau par la transpiration de la plante (d'une culture particulière) additionnée de l'évaporation de l'eau du sol dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ (capacité de rétention maximale en eau du sol). Elle est le produit de l'évapotranspiration potentielle ETP, servant de référence car tenant compte du climat (condition physique) et une surface de référence (une prairie) et du coefficient cultural de la plante *kc* qui regroupent les réponses de la plante en termes d'évaporation (culture) et de transpiration (sol). [34]

$$ETM = ETP \times kc$$

Le Tableau 4 regroupe le kc, l'ETP et l'ETM du maïs pour l'année 2007. L'ETP est obtenue en faisant la moyenne de l'ETP par décade de l'année 2007 de quatre stations Divajeu, Piégros, Saint Sauveur en Diois et Livron sur Drôme.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
kc	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,9	1,15	1,05	0,8	0,3	0,3	0,3
ETP (mm)	14,53	24,63	62,55	100,68	121,30	140,65	161,53	128,18	96,45	51,08	28,70	13,08
ETM (m³)	43,58	73,88	187,65	302,03	485,20	1265,85	1857,54	1345,84	771,60	153,23	86,10	39,23

Tableau 4 Coefficients culturels et ETM du maïs et ETP en 2007 dans le bassin de la Drôme [11] [Météo France]

L'itinéraire technique du maïs grain sur un hectare a été fait en combinant diverses sources afin de présenter un itinéraire général [14, 15, 24, 34-36] (Tableau 5).

	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Stade de développement	Préparation du sol	Préparation du sol et semis (mai avril) et début de la levée	Levée	4 feuilles à 10 feuilles	Floraison femelle	Grain laiteux	Grain pâteux Récolte	Grain vitreux Récolte
Travail du sol	Labour, déchaumage, faux semis, girobroyage		Hersage Binage Buttage					
Semis		27 kg de semences traitées par FORCE 1,5 G à 12,2 kg/ha (insecticide)						
Fertilisation	Amendement organique et PK (30 tonnes de fumier bovin)		Fertilisation azotée 180 kg N/ha					
Protection de la culture		Désherbage programme prélevée ISARD 1,3L	Désherbage programme postlevé CALLISTO 1,5L					
Irrigation				140 mm par mois				
Récolte								11,4 tonnes en 2007

Tableau 5 Itinéraire technique du maïs en Drôme pour un hectare

L'amendement organique permet de pourvoir à l'intégralité des besoins en éléments potassium (K) et phosphore (P). Le Tableau 6 donne la composition en éléments fertilisants d'une tonne de fumier bovin et les besoins de la plante.

Tableau 6 Composition en éléments fertilisants d'une tonne de fumier bovin et les besoins en éléments du maïs. En italique, quantité d'éléments avec apport de 30 tonnes de fumier de bovin sur un hectare. [15]

	N kg	P ₂ O ₅ kg	K ₂ O kg
Fumier bovin	6,5 <i>(195)</i>	3 <i>(90)</i>	11 <i>(330)</i>
Besoin pour un hectare de maïs	240	90	270

Il existe des bases de données sur les pratiques culturales de la filière végétale et animale. Celle utilisée dans cette étude est Agribalyse afin de comparer nos résultats avec les leurs. Agribalyse est une base de données française faisant un bilan cultural à l'échelle nationale. Ainsi, on peut déjà pointer la difficulté d'obtenir un bilan à l'échelle d'un bassin versant et la spécificité de la région. La Figure 14 donne le bilan de la culture du maïs par Agribalyse. De plus, cette base de données quantifie les émissions polluantes dans l'air et dans le sol.

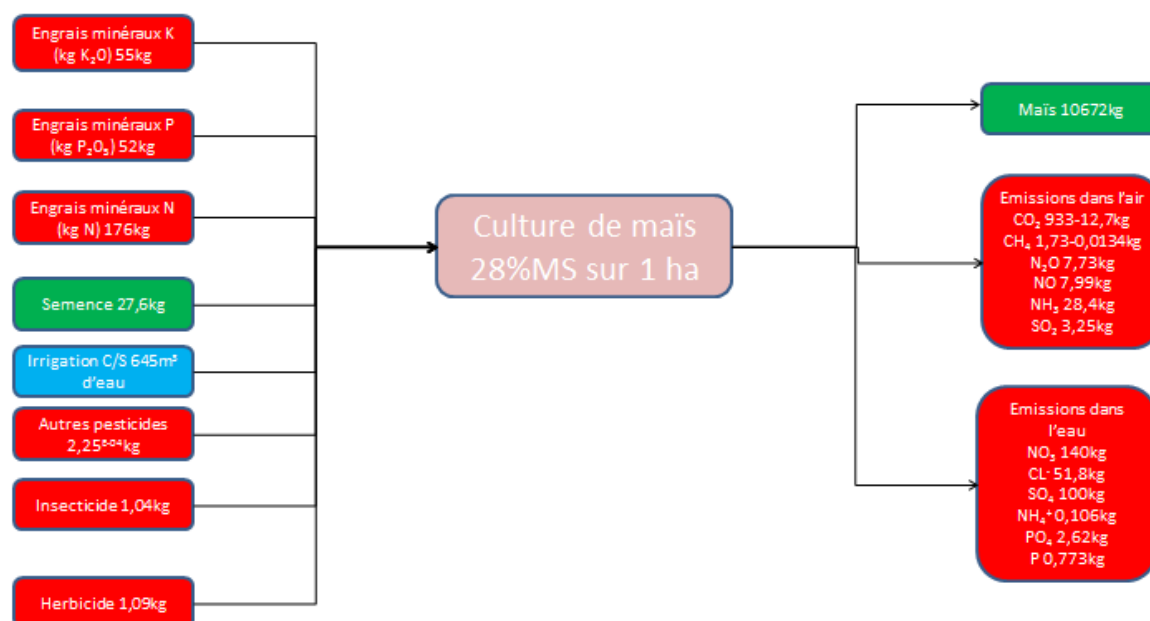


Figure 14 Pratique culturale d'un hectare de maïs récolté à 28% d'humidité d'après Agribalyse

Il y a de nettes différences entre les recherches bibliographiques et les données issues de la base Agribalyse. Par exemple, l'irrigation, qui prend une référence nationale de 645 m³/ha, n'est pas adaptée à la zone étudiée en Drôme qui a une pratique de 140 mm pendant trois mois soit 4200 m³/ha chaque année [35]. L'entrée « autres pesticides » et les pesticides utilisés sur Agribalyse sont inconnus. Ainsi, ni la matière active, ni la quantité apportée ne sont connues. Car généralement, l'agriculteur utilise plusieurs insecticides, herbicides, fongicides sur un même champ et leur dose diffère d'un produit à un autre. Ceci complique l'analyse.

Cette base de données n'est pas assez précise pour renseigner correctement des pratiques culturales à l'échelle d'un bassin versant.

Les émissions polluantes données par cette base permettent en revanche d'obtenir un ordre de grandeur sur les transferts de pollution (eau et air).

Une autre base de données a aussi été utilisée : Ecoinvent, et les résultats obtenus sont nettement moins satisfaisants qu'Agribalyse. Tout d'abord, la source de ces données est plus difficile à trouver et à analyser. Ce sont des données soit à l'échelle mondiale soit à l'échelle d'un pays, ce qui ne permet pas de faire une étude précise dans une zone donnée. De plus, il y a des résultats surprenants, par exemple : il faut ensemercer un champ d'un hectare avec un rendement d'environ 11,4 tonnes/ha avec 244 kg de semences ([Maize seed, for sowing {GLO}| market for | Alloc Def, U]= 0,021471kg to produce 1 kg maize grain) contre 27 kg supra. Ensuite, la liste de toutes les substances émises dans le sol est longue ce qui la rend difficile à étudier, par exemple déterminer les matières actives (pesticides) épandue sur le champ et leurs émissions (air, eau, sol) sur Ecoinvent n'est pas aisé. Pour finir, l'irrigation dont il est fait référence dans chaque pays est peu vraisemblable. L'ICV d'Ecoinvent est en annexe 3 Tableau 31.

Pour cette analyse, l'étude ne prendra pas les bases Agribalyse ni EcoInvent comme données caractérisant la culture du maïs en Drôme.

Le Tableau 7 est un tableau repris d'une thèse [4] qui a répertorié les facteurs d'émissions polluantes lors d'application d'engrais et de produits phytosanitaires dans l'eau et l'air en pourcentage massique de l'élément concerné. Les références indiqués sont laissées et pourront être retrouvées dans la bibliographie.

Référence	Air (%)			Eau (%)		
	N ₂ O	NO _x	NH ₃	Nitrates	Phytosanitaires	Phosphore
BIO Intelligence Service, (2010) [37]	1,75	1	6,7	13,6	1	
Cherubini, (2010) [38]	1-5					
Renouf et al., (2008) [39]	6	17	2,8	27,8	1,5	12,8
De Ruyck et al., (2006) [40]	2,5					
Poitrat, (2007) [41]	1,6					
Bilan	2,97 ± 1,6	9 ± 8	4,75 ± 1,95	20,7 ± 7,1	1,25 ± 0,25	12,8

Tableau 7 Facteurs d'émissions de polluants dus à l'application d'engrais et de produits phytosanitaires sur un champ (% massique de l'élément concerné) [4]

Un rapport de l'ADEME (ACV des biocarburants de 1^{ère} génération en France) [37] permet aussi de comparer la pratique culturale et les émissions polluantes pour un hectare de maïs grain. Le Tableau

8 est une synthèse des chiffres avancés dans les annexes du rapport. Les émissions polluantes sont aussi ramenées au pourcentage massique de l'élément concerné. Grâce à ces tableaux, des émissions polluantes au champ (sol) ont pu être obtenues en plus des émissions dans l'air et dans l'eau du Tableau 8.

Entrants		Valeur	
Semence		27,23 kg	
Engrais N minéral (doses épandues)		188,91 kg	
Engrais N organique (doses épandues)		44,42 kg	
Engrais P ₂ O ₅ (quantité exportée)		66,00 kg	
Engrais K ₂ O (quantité exportée)		82,54 kg	
Produits phytosanitaires		2,47kg	
Emissions		Valeur	Pourcentage massique
Emission N ₂ O au champ		3,28 kg	1,41%
Emission NH ₃ au champ		14,78 kg	6,33%
Emission NO _x au champ		2,33 kg	1%
Emission pesticides air		0,25 kg m.a	10,12%
Emission pesticides sol		1,24 kg m.a	50,20%
Emission pesticides eau		0,02 kg m.a	0,81%
Emission nitrates au champ		40,00 kg	17,14%
Emission phosphate au champ		0,10 kg	0,15%

Tableau 8 Bilan d'une culture de maïs d'un hectare [37]

En regroupant, les Tableau 7 et Tableau 8 avec l'itinéraire technique décrit plus haut, le bilan qui en résulte pour un hectare de maïs grain est le suivant (Tableau 9) :

Tableau 9 Bilan des intrants et des émissions d'un hectare de culture de maïs.

Intrants	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Oct
Semence (kg)		27					
Engrais N organique (kg)		195					
Engrais N minéral (kg)			180				
Engrais P ₂ O ₅ (kg)		90					
Engrais K ₂ O (kg)		330					
Pesticides (kg de matière active)		0,183 téfluthrine 1,008 dimethenamid-p		0,150 mésotrione			
Irrigation (mm)				140	140	140	
Récolte (tonnes)							11,4
Emissions							
Emission N ₂ O au champ (1,41%)					5,29 kg		
Emission NH ₃ au champ (6,33%)					23,73 kg		
Emission nitrates au champ (17,14%)					64,28 kg		
Emission phosphate au champ (0,15%)					270 g		
Emission NO _x au champ (1%)					3,75 kg		
Emission pesticides sol (50,20%)					673 g		
Emission pesticides air (0,25%)					3,4 g		
Emission N ₂ O air (2,97%)					11,14 kg		
Emission NO _x air (9%)					33,75 kg		
Emission NH ₃ air (4,75%)					17,81 kg		
Emission pesticides eau (1,03%)					13,8 g		
Emission nitrates eau (20,7%)					77,63 kg		
Emission phosphore eau (12,8%)					11,52 kg		

Seule la matière active en kg pour chaque pesticide est prise en compte dans le calcul du bilan. L'insecticide FORCE 1,5 G contient 1,5% de téfluthrine (granulé). L'herbicide ISARD est constitué de 720 g/l de dimethenamid-p (pulvérisation) et l'herbicide CALLISTO de 100 g/l de mésotrione (pulvérisation).

Grâce à ce tableau, l'aspect qualitatif de la culture va pouvoir être analysé et converti en impacts environnementaux.

b. La culture de la betterave

La betterave, *Beta vulgaris*, est une plante herbacée de la famille des Chénopodiacées, cultivée pour sa racine, comme légume dans l'alimentation humaine, comme plante fourragère (betterave fourragère) et pour la production du sucre (betterave sucrière). La betterave sucrière est une plante bisannuelle. La première année (phase végétative), la plante se développe et constitue son stock de sucre dans la racine. La deuxième année correspond à sa phase reproductive. L'intérêt de cette culture étant la racine, la récolte de la betterave se fait à la fin de sa phase végétative qui dure

environ 200 jours (de mars-avril à octobre-novembre). Le type de sol préférentiel pour l'implantation d'une culture de betterave dans la région Nord-Pas-de-Calais est le limon argileux car il reste frais en profondeur (2 % de matière organique et 15 à 20 % d'argile). Le pH doit être voisin de la neutralité (optimum entre 7 à 7,5).

Ce type de culture est adapté aux climats tempérés et les conditions de températures optimales sont comprises entre 15 et 25°C. Ces caractéristiques expliquent que la betterave n'est pas présente dans les régions du Sud comme la Drôme. De plus, le manque de données et de cas d'étude sur l'implantation de betterave dans ce type de région empêchent d'envisager et d'analyser dans ce rapport une telle approche.

Les besoins en eau de la betterave s'élèvent à 7050 m³/ha, en suivant la même équation que pour le maïs, avec un rendement en 2007 de 77,3 tonnes/ha [22], un taux d'humidité de 76% et un EUE (coefficient d'efficacité d'utilisation de l'eau) de 380 g H₂O/g MS [31].

$$BESOIN\ EN\ EAU\ DE\ LA\ BETTERAVE = Rendement \times (1 - Humidité) \times EUE$$

$$BEB = 77,3 \times (1 - 0,76) \times 380$$

$$BEB = 7050\ m^3/ha$$

Par rapport à un hectare de maïs, un hectare de betterave a nettement plus besoin d'eau. Mais il ne faut pas oublier que rendement et quantité de matière sèche (MS) ne sont pas du tout les mêmes pour ces deux cultures d'où cette différence nette (le maïs a 65% de MS et 11,4 tonnes/ha soit 7,41 tonnes de MS/ha, la betterave a 24% de MS et 77,3 tonnes/ha soit 18,55 tonnes de MS/ha). Dans certaines sources, il est mentionné que la consommation de la betterave sucrière est comprise entre 600 et 700 mm d'eau, ce qui est en accord avec le résultat. Ceci renforce le fait que l'implantation de la betterave en Drôme n'a pas été envisagée.

L'irrigation de la betterave est rare, elle ne concerne que 10% de la SAU dans le Nord-Pas-de-Calais et représente 110 mm/an [42].

Le Tableau 10 regroupe le kc, l'ETP et l'ETM de la betterave pour l'année 2007. L'ETP est obtenue en faisant la moyenne de l'ETP par décade de l'année 2007 de trois stations Lillers et deux stations à Steenwerck.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
kc	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,7	1	1	1	1	0,3	0,3
ETP (mm)	20,90	22,33	51,33	101,87	110,23	110,70	130,43	99,10	66,80	24,53	14,97	13,33
ETM (m ³)	62,70	67,00	154,00	509,33	771,63	774,90	1304,33	991,00	668,00	245,33	44,90	40,00

Tableau 10 Coefficients culturaux et ETM de la betterave dans le bassin de la Lys et ETP en 2007 [Météo France]

La SAU dans la zone étudiée de betterave sucrière est difficile à déterminer. D'après le recensement agricole 2010 mais avec le secret statistique, la SAU est d'environ 7000 ha (7600 ha en 2000). Grâce à la Figure 15, une approximation a été faite : les petites régions agricoles placées entièrement dans le cercle rouge sont additionnées (celles de 2500 ha, 1700 ha et de 1200 ha). Pour les deux régions coupées par le cercle rouge (celles de 3200 ha et de 1300 ha), la SAU est divisée arbitrairement par deux. La SAU ainsi calculée s'élève à 7650 ha. Ce chiffre sera repris dans le cadre de l'étude.

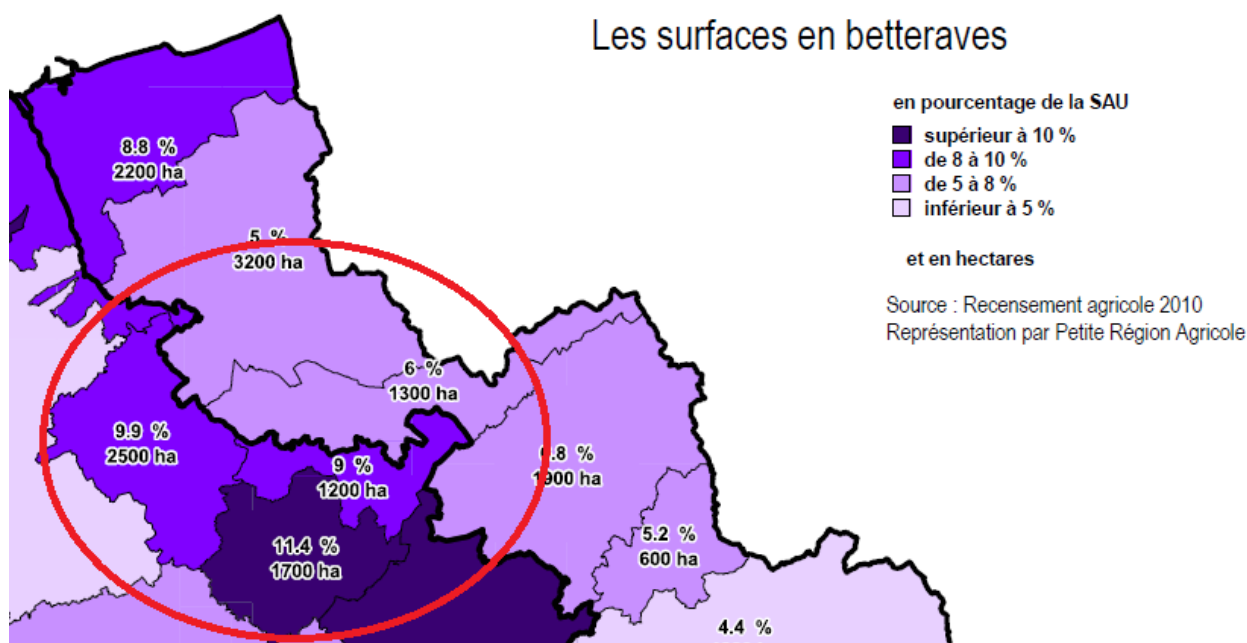


Figure 15 Les surfaces en betteraves du Nord-Pas-de-Calais par Petite Région Agricole en 2010 [11]

L'itinéraire technique de la betterave sucrière sur un hectare a été reconstitué en combinant diverses sources afin de présenter un itinéraire général (Figure 16) [16-18, 21, 42, 43].

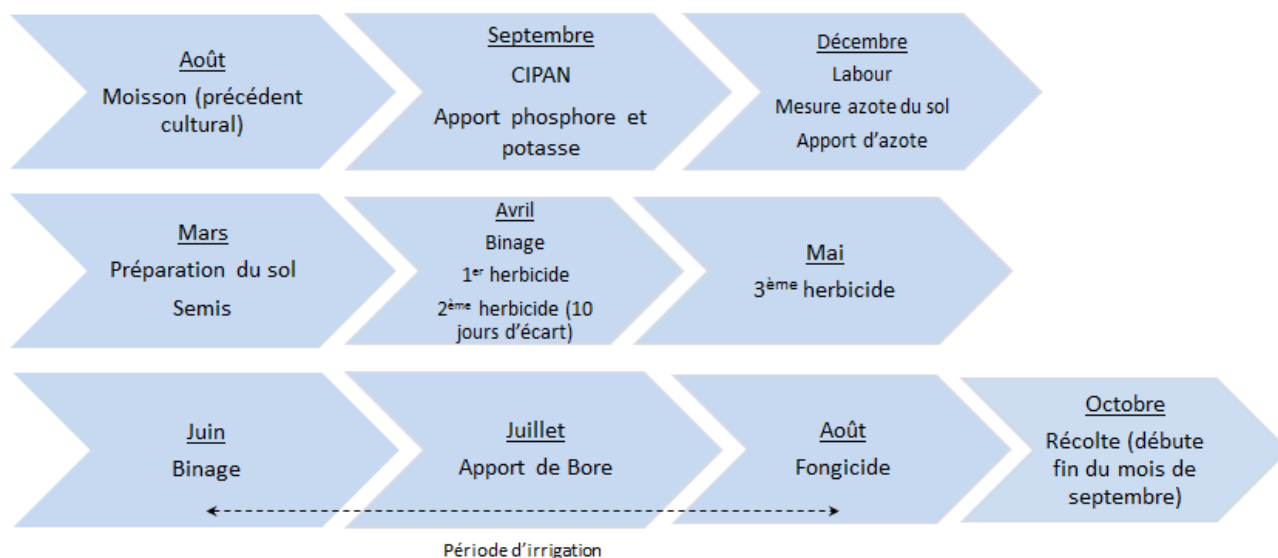


Figure 16 Itinéraire technique de la betterave au Nord-Pas-de-Calais pour un hectare

Les 3 herbicides utilisés sont les suivants :

1. GOLTIX 90 ULTRADISPERSIBLE : apporté 3kg/ha, contient 900 g/kg de métamitron (pulvérisation).
2. BETAM COMBI : apporté 2,0 L/ha, contient 100 g/L d'éthofumesate et 80 g/L de phenmédiphame (pulvérisation).
3. BETANAL NOVATION: apporté 4,0 L/ha, contient 151 g/L d'éthofumésate, 75 g/L de phenmédiphame, et 25 g/L de desmédiphame (pulvérisation).

Le fongicide utilisé est AMISTAR TOP : apporté 1,0 L/ha, contient 200 g/L d'azoxystrobine et 125 g/L de difénoconazole (pulvérisation).

L'insecticide dans la culture de la betterave n'est pas systématique contrairement aux fongicides et aux herbicides. L'IFT (indice de fréquence de traitement) confirme cette observation [19, 20].

La quantité totale de m.a (matière active) s'élève ainsi à 4,389 kg/ha.

Le bilan fait à partir d'Agribalyse est représenté Figure 16. Cependant, de grandes disparités se retrouvent toujours en raison de son échelle nationale et globalisée (notamment, dans les pesticides). Mais les apports en azote, potassium et phosphore sont proches ce qui permettra de comparer les ordres de grandeurs et conforter l'itinéraire technique (Figure 16).

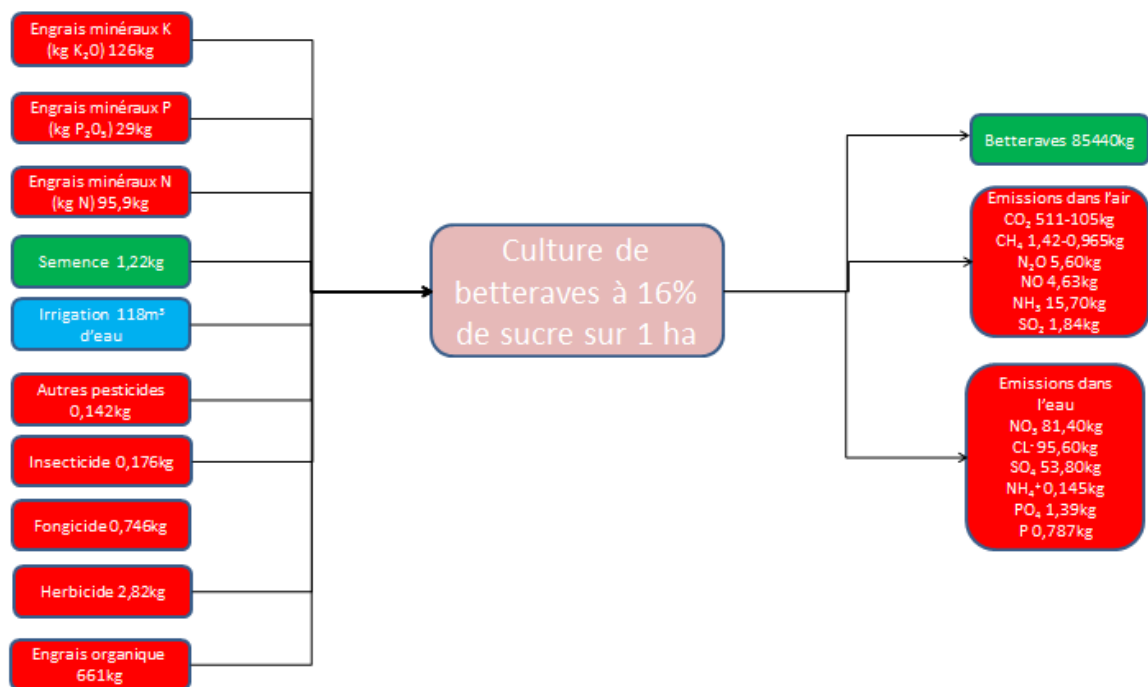


Figure 17 Pratique culturale d'un hectare de betteraves industrielles récolté à 16% de sucre d'après Agribalyse

Pour les mêmes raisons que pour la culture du maïs, l'étude ne prendra pas les bases Agribalyse ni EcolInvent (donnée en annexe 2 Tableau 32) comme données caractérisant la culture de la betterave au Nord-Pas-de-Calais.

En reprenant la même approche que pour le maïs, le Tableau 11 propose une synthèse des chiffres avancés dans les annexes du rapport d'ADEME : les émissions polluantes sont aussi ramenées au pourcentage massique de l'élément concerné.

Tableau 11 Bilan d'une culture de betterave d'un hectare [37]

Intrants		Valeur
Semence		1,28 kg
Engrais N minéral (doses épandues)		97,30 kg
Engrais N organique (doses épandues)		32,57 kg
Engrais P ₂ O ₅ (quantité exportée)		47,84 kg
Engrais K ₂ O (quantité exportée)		159,27 kg
Produits phytosanitaire		3,92 kg
Emissions	Valeur	Pourcentage massique
Emission N ₂ O au champ	2,84 kg	2,19%
Emission NH ₃ au champ	8,77 kg	6,75%
Emission NO _x au champ	2,60 kg	2,00%
Emission pesticides air	0,39 kg m.a	9,95%
Emission pesticides sol	1,96 kg m.a	50,00%
Emission pesticides eau	0,04 kg m.a	1,02%
Emission nitrates au champ	17,47 kg	13,45%
Emission phosphate au champ	0,10 kg	0,21%

En regroupant, les Tableau 7 et Tableau 11 avec l'itinéraire technique décrit plus haut, le bilan qui en résulte pour un hectare de betterave est le suivant (Tableau 12) :

Intrants	Sept	Déc	Mars	Avril	Mai	J	J	Août	Oct	Nov
Semence (kg)			2,6							
Engrais N organique (kg)		84								
Engrais N minéral (kg)		100								
Engrais P ₂ O ₅ (kg)	37									
Engrais K ₂ O (kg)	100									
Pesticides (kg de matière active)			2,7 métamitron 0,2 éthofumesate 0,16 phenmédiphame		0,604 éthofumésate 0,3 phenmédiphame 0,1 desmédiphame			0,2 azoxystrobine 0,125 difénoconazole		
Irrigation (mm)						37	37	37		
Récolte (tonnes)									77,3	
Emissions										
Emission N ₂ O au champ (2,19%)	4,03 kg									
Emission NH ₃ au champ (6,75%)	12,42 kg									
Emission nitrates au champ (13,45%)	24,78 kg									
Emission phosphate au champ (0,21%)	77,7 g									
Emission NO _x au champ (2%)	3,68 kg									
Emission pesticides sol (50%)	2,19 kg									
Emission pesticides air (9,95%)	437 g									
Emission N ₂ O air (2,97%)	5,46 kg									
Emission NO _x air (9%)	16,56 kg									
Emission NH ₃ air (4,75%)	8,74 kg									
Emission pesticides eau (1,02%)	44,7 g									
Emission nitrates eau (20,7%)	38,09 kg									
Emission phosphore eau (12,8%)	4,74 kg									

Tableau 12 Bilan des intrants et des émissions d'un hectare de culture de betterave

3) Les procédés de production du bioéthanol

a. Le procédé de fermentation à partir du maïs

Le bioéthanol est obtenu à partir de la fermentation de sucres (glucoses) présents dans l'amidon des grains (environ 70% du grain). Le procédé utilisé est le « dry mill process » (Figure 18) [44] [45].

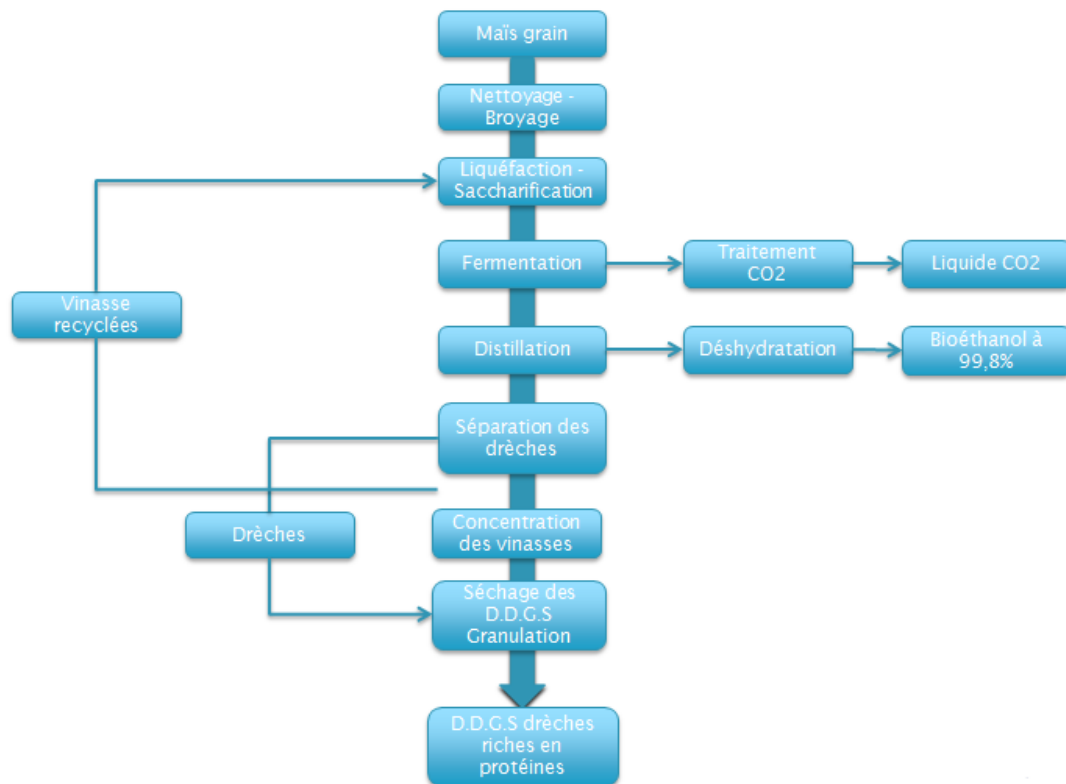


Figure 18 Le process "dry mill" [Les biocarburants Etats des lieux, perspectives et enjeux du développement, Daniel Ballerini, 2006]

Les grains sont d'abord broyés jusqu'à obtention d'une farine fine. Des enzymes (alpha-amylases) et de l'eau sont additionnés à la farine et chauffées à haute température (120-150°C) dans un cuiseur. Cette étape est la liquéfaction de l'amidon du grain. Après refroidissement, l'amidon est dégradé en glucose par une autre enzyme (glucamylase).

Après ces étapes, les procédés du maïs et de la betterave sont analogues.

L'ajout de levure entraîne la fermentation des sucres. Elle peut être en continue (plusieurs fermenteurs séquentiels) ou en discontinue, et dure environ 48 heures. Une liqueur fermentée (ou bière) est obtenue en sortie et contient entre 8 et 15 % d'alcool. Il faut alors séparer l'éthanol de cette liqueur par un système de distillations successives qui fournit de l'éthanol pur à 95%. La dernière étape est une déshydratation sur tamis moléculaire afin d'obtenir un produit pur à 99,8%.

Ce procédé génère deux coproduits : des drèches (étape de distillation) ou DDGS (Dried Distillers Grains with Solubles : drèches + vinsasse) et le dioxyde de carbone (étape de fermentation). Les drèches correspondent aux résidus du maïs grain broyé. Ils contiennent des protéines, des fibres, de l'huile des grains et de l'amidon résiduel. Les drèches trouvent un débouché dans l'alimentation animale.

Le dioxyde de carbone est utilisé dans l'industrie, comme par exemple dans l'industrie agro-alimentaire (boissons gazeuses).

L'usine d'Abengoa utilise ce procédé du « dry mill ». Son rendement sur une année a été déterminé par diverses sources : le site de l'usine, différentes revues de presse, l'AGPM (Association Générale des Producteurs de Maïs) et l'ADEME qui a fait un bilan sur l'usine Abengoa en 2010. Les données obtenues ont été corrélées avec une source canadienne (CRAAQ) se rapportant au procédé du « dry mill », les ordres de grandeur sont proches (Tableau 13).

Ethanol	Maïs grain	Drèches (DDGS)	CO2	Source
420L <i>1L</i>	1 t <i>2,38 kg</i>	290 kg <i>690 g</i>		Article Sud-Ouest 2012 [46]
400L <i>1L</i>	1 t <i>2,5 kg</i>			ABBAN 2012 [47]
246.000.000L <i>1L</i>		145.000 t <i>566 g</i>		Site Abengoa Bioenergy (visité en mars 2015) [28]
250.000.000L <i>1L</i>	500.000 t <i>2 kg</i>	160.000 t <i>640 g</i>		AGPM (site visité en mars 2015) [48]
<i>1L</i>	<i>2,69 kg</i>	<i>807 g</i>	<i>942 g</i>	ADEME 2010 [37]
350-450 L <i>1L</i>	1 t <i>2,5 kg</i>	300-325 kg <i>780 g</i>	350 kg <i>875 g</i>	CRAAQ Québec 2008 [45]
1L	2,41 kg	697 g	909 g	Bilan pour 1L de bioéthanol à partir des 6 sources précédentes

Tableau 13 Rendement de l'usine Abengoa Bioenergy France sur une année. La dernière ligne est le rendement pour le process « dry mill ». En italique, les données sont ramenées à 1 litre de bioéthanol.

b. L'usage de l'eau dans la transformation du maïs en bioéthanol

Afin d'avoir une vision plus précise des entrées et sorties d'eaux ainsi que, des produits et des coproduits, un schéma du procédé industriel est donnée en annexe (Annexe 4 figure 20). La quantification des flux n'a pas pu être présentée faute de données suffisantes.

Le Tableau 14 issu du registre français des émissions polluantes (IREP) [26] permet de quantifier les entrées d'eaux (prélèvements) et qualifier les sorties d'eaux (émissions polluantes). Les prélèvements d'eau sont des prélèvements dans les eaux superficielles. Cependant, les prélèvements entre les années 2009/2012 et 2013 diffèrent énormément (la mise en fonction de l'usine date de 2008). Concernant les émissions polluantes, celles-ci sont indirectes, ce qui signifie que ces eaux vont être prises en charge dans une station d'épuration avant d'être rejetées dans l'environnement.

Tableau 14 Prélèvements d'eau et émissions de polluants par l'usine Abengoa Bioenergy France de 2009 à 2013. [26]

Milieu prélevé	Prélèvements d'eau en m3/an				
	2009	2010	2011	2012	2013
Eau de surface	55 400 000	49 700 000	47 800 000	43 800 000	96 700
Eau souterraine	0	0	0	0	0
Réseau	0	0	0	0	0
Mer ou océan	0	0	0	0	0
Polluants	Emissions dans l'Eau (indirect) kg/an				
	2009	2010	2011	2012	2013
Demande biologique en oxygène (DBO5)	140 000	54 200	n.d.	n.d.	68 700
Demande chimique en oxygène (DCO)	268 000	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Par contre, il n'y a pas d'explications plus détaillées sur l'utilisation de cette eau. Il est difficile d'analyser ces données. Les IREP et ICPE n'ont pas pu donner plus d'informations sur les rejets polluants car cela concerne uniquement l'usine. La prise de contact avec l'usine n'a pas permis d'obtenir davantage d'informations.

La base de données Ecoinvent a permis d'avoir un bilan de la ressource en eau et du procédé pour un litre de bioéthanol à 95%, présenté Tableau 15 (Data is from the etha+ project (Alcosuisse, CH), technology by French ethanol plant supplier, modelling by ENERS (CH)).

Tableau 15 Bilan des intrants et sortants pour un litre de bioéthanol à 95% produit d'après Ecoinvent

Intrants						
Eau prélevée souterraine en litre	Eau prélevée de surface en litre	Eau de refroidissement (origine inconnue) en litre	Maïs 15% H ₂ O en kg	Acide sulfurique en g	Soude en g	Sulfate d'ammonium en g
0,33	0,56	1,63	1,20	8,95	13,43	3,60

Sortants			
Eau évaporée en litre	Eau rejetée en litre	CO ₂ en kg	DDGS 8% H ₂ O en g
1,07	2,13	930	385

La quantité de maïs nécessaire et la quantité de drèches produites sont deux fois moins importantes que dans les rendements d'Abengoa (Tableau 13). Le CO₂ a le même ordre de grandeur.

Concernant l'eau, la différence entre les sorties et les entrées donnent un bilan positif de 0,69 litre. En tenant compte de l'eau contenu dans le maïs (entrée d'eau) et les coproduits (sortie d'eau), le

bilan est de 0,54 litre. Ainsi, les sorties sont supérieures aux entrées d'eau d'environ 20%, ce qui montre un bilan relativement équilibré quoique partiellement satisfaisant.

Les États-Unis étant le plus grand producteur de bioéthanol à partir de maïs, il était logique de s'informer sur les procédés de diverses multinationales américaines ainsi que sur des rapports et articles scientifiques américains. Un article scientifique américain [49] s'intéresse à la consommation d'eau dans la production de bioéthanol pour le procédé « dry mill ». Il établit, grâce à un modèle développé par USDA ARS (U.S. Department of Agriculture - Agricultural Research Service) utilisant ASPEN PLUS et le logiciel SuperPro Designer®, que la consommation d'eau (uniquement dans le procédé) pour produire 1 litre de bioéthanol à 99,8% s'élève à 3 litres d'eau. Dans cette eau, il comptabilise l'évaporation, les pertes du refroidisseur, des vidanges, des eaux rejetées et de l'eau incorporée aux produits.

Par comparaison avec Ecoinvent, cet ordre de grandeur de 3 litres en sortie est cohérent (Tableau 15). Ainsi, l'eau consommée dans le procédé pour la production de bioéthanol sera dans cette étude de 3 litres. Les quantités de produits et coproduits sont rapportées dans le Tableau 13.

c. Le procédé de fermentation à partir de la betterave

En arrivant à l'usine, les betteraves sont déjà effeuillées. Comme le sucre est contenu dans la racine et que celle-ci est couverte de terre, la première étape du procédé de fabrication est le lavage. Puis, les betteraves sont coupées en fine lamelles, appelées cossettes. Elles sont placées dans de l'eau afin que le sucre (saccharose constitué d'une molécule de glucose et une molécule de fructose) diffuse hors des lamelles. Un jus de diffusion est ainsi obtenu, appelé jus vert, et va être fermenté après addition de levure. Ce jus peut contenir des impuretés (protéines), qui seront enlevées en ajoutant de la chaux et du CO₂ (étape de carbonatation). La fermentation est précédée d'une pasteurisation pour éliminer les bactéries présentes afin de permettre une activité optimale des levures et aucune réaction parasite. A ce stade, l'alcool éthylique présente de nombreuses impuretés nécessitant une distillation pour les éliminer. La dernière étape est une déshydratation afin de débarrasser l'éthanol de l'eau résiduelle [4, 44, 50-54].

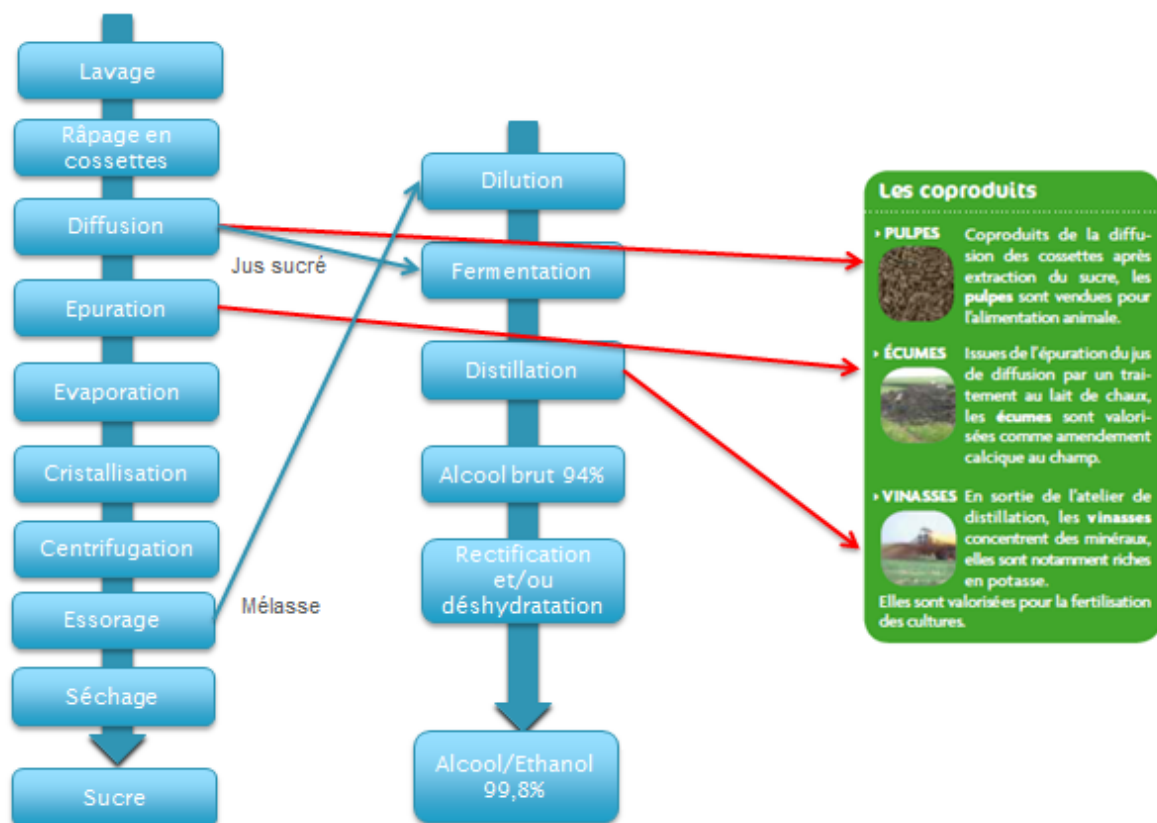


Figure 19 Le procédé de production du sucre et du bioéthanol à l'usine TEREOS [55]

Cependant, il ne faut pas oublier que la principale finalité de la betterave sucrière est la production de sucre. C'est pourquoi, une distillerie et une sucrerie sont souvent rattachées. En effet, après la diffusion, le jus vert ne sera pas fermenté mais épuré afin de produire du sucre. Le jus épuré subira ensuite une évaporation pour donner du sirop. Cristallisé, le sirop se scindera en deux parties : une solide et une liquide. La partie solide, une fois essorée et séchée, deviendra du sucre et l'autre partie, la mélasse, donnera de l'éthanol par fermentation. Dans l'usine TEREOS de Lillers, la production de bioéthanol est essentiellement issue de la valorisation de la mélasse. Le procédé permettant l'extraction du sucre (filrière sucrière) et le procédé de production du bioéthanol sont schématisés en Figure 19.

Les coproduits sont nombreux dans le procédé :

Dans les eaux de lavage, des résidus solides sont récupérés et peuvent servir dans le bâtiment ou la construction. De la terre, de l'herbe et des feuilles de betteraves provenant de ces eaux, sont également valorisables, dans la fabrication d'engrais naturels par exemple.

Lors de la diffusion, les cossettes sont récupérées, pressées, déshydratées et transformées en granulés. Ce produit est commercialisé comme pulpes de betteraves et destiné à l'alimentation

animale. De plus, le jus vert avant la fermentation sera clarifié et filtré (étape d'épuration, cf. Figure 19) ce qui produira des amendements basiques ou plus communément de l'écume (chaux).

Lors de la distillation, l'alcool est séparé de la vinasse. La méthanisation de la vinasse produit du biogaz et les déchets sont utilisés comme amendement de potasse dans les cultures (2% d'azote et 5% de potassium).

Le rendement de l'usine de TEREOS à Lillers est donné par le Tableau 16.

Sur l'année : 19.000 ha, 94 t/ha, 16% sucre soit 1.786.000 t de betteraves	
Production annuelle	Production ramenée à 1 t de betteraves
100.000 t de sucre blanc	56 kg de sucre blanc
110.000 t de sirop	61 kg de sirop
73.000 t de pulpes surpressées	41 kg de pulpes surpressées
65.000 t de pulpes déshydratées	36 kg de pulpes déshydratées
80.000 m ³ d'alcool brut	45 L d'alcool brut
55.000 t d'écumes	31 kg d'écumes
35.000 t de vinasses concentrées	20 kg de vinasses concentrées

Tableau 16 Production annuelle de l'usine TEREOS ramenée à une tonne de betterave [55]

Il est compliqué d'utiliser ces données pour déterminer exactement la quantité de betteraves nécessaire à la production d'un litre de bioéthanol. En effet, comme les produits sont le sucre et l'éthanol, il est impossible de connaître le ratio en betterave sucre/bioéthanol. De plus, l'usine conserve du sirop en fin de campagne ce qui déséquilibre le bilan et donc, les rendements. De plus, des coproduits provenant de la production de sucre peuvent être utilisés pour produire du bioéthanol (mélasse) et ceci doit être aussi pris en compte.

d. L'usage de l'eau dans la transformation de la betterave en bioéthanol

Comme pour l'usine d'Abengoa Bioenergy France, le Registre Français des Emissions Polluantes [26] fournit les prélèvements de l'usine TEREOS à Lillers de 2009 à 2013. Il faut savoir que l'usine ne fonctionne pas toute l'année (environ 100 jours par an, de septembre à décembre). L'eau utilisée dans le procédé provient majoritairement de prélèvements dans le sous-sol (Tableau 17).

Milieu prélevé	Prélèvements d'eau en m ³ /an				
	2009	2010	2011	2012	2013
Eau de surface	0	0	0	0	0
Eau souterraine	480000	588000	508000	624000	453 000
Réseau	4750	3270	3870	4660	3490
Mer ou océan	0	0	0	0	0
Polluant	Emission dans l'air t/an				
	2009	2010	2011	2012	2013
CO ₂ total (CO ₂ d'origine biomasse et non biomasse)	207 000	217 000	218 000	202 000	201 000
Oxydes d'azote (NO _x - NO + NO ₂) (en eq. NO ₂)	414	430	429	403	396
Oxydes de soufre (SO _x - SO ₂ + SO ₃) (en eq. SO ₂)	833	837	839	871	879

Tableau 17 Prélèvements d'eau et émissions de polluants pour l'usine TEREOS de Lillers entre 2009 et 2013. [26]

Comme pour le procédé du maïs, ces informations sont difficiles à valoriser faute d'explications détaillées de ces données. La prise de contact avec l'usine n'a pas permis d'obtenir davantage d'informations.

La modélisation du procédé à partir d'EcolInvent est plus compliquée que pour l'usine d'Abengoa car il est question d'une sucrerie/distillerie, donc deux filières dans une même usine pour l'obtention de produits différents, sachant qu'un des produits, le sucre, donne des coproduits utilisables pour la phase de distillation. Pour se rapprocher au plus près du fonctionnement de l'usine de TEREOS, il fallait alors combiner trois procédés :

- Le procédé dit « direct » : produire du bioéthanol à partir de la betterave.
- Produire du sucre à partir de la betterave (filière sucrière).
- Produire du bioéthanol avec la mélasse issue de la production du sucre.

Les deux derniers procédés forment le procédé dit « indirect ».

L'approche avec la base de données Ecoinvent est représentée par la Figure 20.

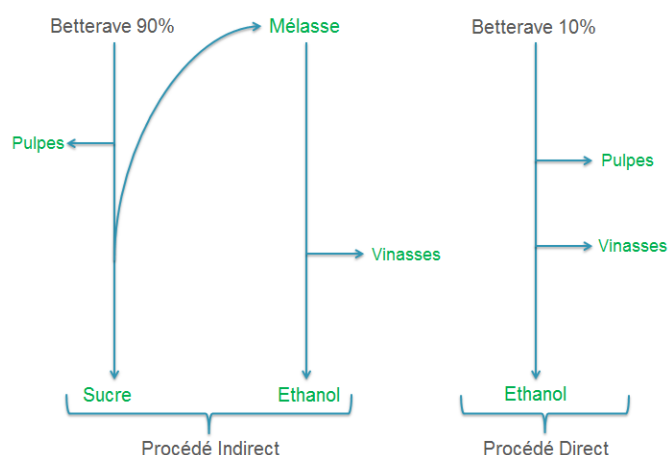


Figure 20 Explication de l'approche via la base de données Ecoinvent

Le Tableau 18 représente le bilan du procédé « direct » et le Tableau 19, le bilan du procédé « indirect ».

Intrants						
Eau prélevée souterraine en mL	Eau prélevée de surface en mL	Eau de refroidissement (origine inconnue) en mL	Betterave 76% H ₂ O en kg	Acide sulfurique en g	Sulfate de sodium en g	Phosphate de sodium en g
268	457	0,35	6,74	20,18	2,69	4,03

Sortants				
Eau évaporée en mL	Eau rejetée en mL	CO ₂ en g	Pulpe 74,4% H ₂ O en kg [56]	Vinasse 48% H ₂ O en kg [57]
0,23	643	563	1,099	4,179

Tableau 18 Bilan du procédé direct pour 1 litre de bioéthanol à 95% via Ecoinvent

Le bilan de l'eau dans Ecoinvent est négatif : les entrées sont supérieures aux sorties (-0,08 litre). En intégrant la quantité d'eau dans les produits et coproduits, le bilan est de -2,49 litres. Soit une erreur assez considérable de 40%. Ce phénomène se retrouvera aussi dans le procédé indirect. Il y a une vraie difficulté d'analyse de ces données par la manque de transparence des sources et de définitions des entrées et sorties du système.

De plus, pour le procédé direct, le lavage des betteraves n'est pas pris en compte sachant que c'est une étape consommatrice d'eau (bien sûr, cette eau est recyclée plusieurs fois avant d'être rejetée et peut provenir pour une partie, de l'eau contenue dans les betteraves). L'eau des betteraves est généralement une des sources d'eau pour cette étape.

Concernant le bilan du procédé indirect, pour fabriquer un litre de bioéthanol, il faut 3,22 kg de mélasse. La mélasse est obtenue grâce à la filière sucrière et pour produire cette quantité de mélasse, il faut produire pas moins de 20 kg de sucre. Ainsi, dans ce procédé, l'utilisation de l'eau sera nettement supérieure à celle du procédé direct.

Tableau 19 Bilan du procédé indirect pour 1 litre de bioéthanol à 95% via Ecoinvent

Intrants							
Eau prélevée souterraine en litre	Eau prélevée de surface en litre	Betterave 76% H ₂ O en kg	Soude en g	Acide sulfurique en g	Produits chimiques inorganiques en g	Produits chimiques organiques kg	Chaux en kg
22,88	39,90	89,6	30,95	35,47	11,98	8,32	2,60

Sortants						
Eau évaporée en litre	Eau rejetée en litre	CO ₂ en kg	Pulpe 74,4% H ₂ O en kg	Vinasse 48% H ₂ O en kg	Sucre en kg	Résidus de chaux en kg
33,50	71,39	7,24	18,28	1,98	20,17	3,28

En faisant le bilan de l'eau (les sorties moins les entrées), la première observation est que le bilan est positif (62,78 litres) c'est-à-dire, il y a plus d'eau qui sort du procédé qu'il n'en rentre sous forme liquide. En comptabilisant l'eau des betteraves et des coproduits, le bilan devient négatif (- 10,52 litres). L'eau contenue dans les betteraves est ainsi une source non négligeable dans le procédé compensant les sorties importantes et rendant ainsi le procédé économe en eau voire, « fournisseur d'eau ».

Afin de comparer le bilan indirect construit à partir de la base Ecoinvent, une autre approche pour quantifier l'usage de l'eau dans le procédé a été utilisée. À partir des données d'un article scientifique [58], le procédé a pu être entièrement détaillé (Annexe 4 Figure 22). Le bilan de l'eau élaboré pour un litre de bioéthanol et le procédé de fabrication est le procédé indirect (c'est-à-dire, à partir des mélasses).

Intrants				
Eau prélevée en litre	Eau betterave en litre	Betteraves 76% H ₂ O en kg	Chaux en kg	Anhydride carbonique en kg
268,03	66,27	98,84	0,30	3,79

Sortants							
Eau évaporée en litre	Eau rejetée en litre	Eau des coproduits en litre	Pulpes déshydratées 12% H ₂ O en kg	Ecumes 60% H ₂ O en kg [55]	Sucres 0,05% H ₂ O en kg	Vinasses 48% H ₂ O en kg	Sol, Pierre, MO en kg
163,33	165,65	5,32	4,44	5,00	13,55	1,87	10,60

Tableau 20 Bilan de l'eau, des produits et coproduits pour le procédé indirect de production d'un litre de bioéthanol à partir de betteraves [58]

Les ordres de grandeurs entre le Tableau 19 et le Tableau 20 sont semblables pour les produits et coproduits. Par contre, pour l'eau, une vraie différence apparaît. Avec ce nouveau bilan, l'équilibre des sorties et entrées d'eau est respecté. De plus, l'utilisation de l'eau dans chaque étape du procédé est nettement plus claire. La différence peut s'expliquer par une étape manquante dans Ecoinvent (le lavage) ou une sur/sous-estimation des valeurs. Pour la suite du rapport, le bilan présenté Tableau 20 et Figure 22 fera office de référence pour la quantification et l'usage de l'eau dans le sous-système « Process ».

L'eau de refroidissement et les vapeurs ne sont pas pris en compte, faute d'informations. Les conduits faisant passer ces eaux sont considérés, par simplification, comme étant des circuits fermés parfaits. En se référant à la production de betterave en 2007 dans la zone étudiée (SAU : 7650 ha, Rendement : 77,3 t/ha), le bilan annuel est le suivant (Tableau 21):

Intrants				
Eau prélevée en m ³	Eau betterave en m ³	Betteraves 76% H ₂ O en tonnes	Chaux en tonnes	Anhydride carbonique en tonnes
1 604 356,93	396 682,59	591 345,00	1 808,04	22 670,09

Sortants								
Eau évaporée en m ³	Eau rejetée en m ³	Eau des coproduits en m ³	Pulpes déshydratées 12% H ₂ O en tonnes	Bioéthanol 0,2% H ₂ O en m ³	Ecumes 60% H ₂ O en tonnes	Sucres 0,05% H ₂ O en tonnes	Vinasses 48% H ₂ O en tonnes	Sol, Pierre, MO en tonnes
977 677,11	991 535,48	31 826,93	26 564,34	5 985,73	29 902,27	81 083,82	11 217,27	63 420,62

Tableau 21 Bilan annuel du procédé indirect de fabrication pour l'année 2007 dans la zone étudiée

Le procédé direct (bioéthanol issu directement du jus vert) a aussi été modélisé toujours à partir de cet article (annexe 4 Figure 23). Ainsi, une comparaison sera rendue possible entre le procédé du maïs et un procédé de valorisation des déchets (procédé indirect de la betterave) mais aussi, avec un procédé de production à partir de betteraves (procédé direct de la betterave). La quantité de

betterave que l'on a obtenue avec cette modélisation, soit 11,26kg, est confortée par des informations issues de la littérature [44].

Le Tableau 22 représente le procédé direct pour un litre de bioéthanol et le Tableau 23, le procédé pour la production 2007 :

Tableau 22 Bilan de l'eau, des produits et coproduits pour le procédé direct de production d'un litre de bioéthanol à partir de betterave [58]

Intrants		
Eau prélevée en litre	Eau betterave en litre	Betteraves 76% H ₂ O en kg
29,44	7,55	11,26

Sortants					
Eau évaporée en litre	Eau rejetée en litre	Eau des coproduits en litre	Pulpes déshydratées 12% H ₂ O en kg	Vinasses 48% H ₂ O en kg	Sol, Pierre, MO en kg
21,53	14,51	0,95	0,50	1,86	1,21

Tableau 23 Bilan annuel du procédé direct de fabrication pour l'année 2007 dans la zone étudiée

Intrants		
Eau prélevée en m ³	Eau betterave en m ³	Betteraves 76% H ₂ O en tonnes
1 546 487,79	396 524,35	591 345,00

Sortants						
Eau évaporée en m ³	Eau rejetée en m ³	Eau des coproduits en m ³	Pulpes déshydratées 12% H ₂ O en tonnes	Bioéthanol 0,2% H ₂ O en m ³	Vinasses 48% H ₂ O en tonnes	Sol, Pierre, MO en tonnes
1 131 023,76	761 841,64	50 146,74	26 059,93	52 525,61	97 784,50	63 393,18

4) L'analyse du cycle de vie de l'usage de l'eau : élaboration et discussion des trois filières de production

Après avoir décrit l'analyse de cycle de vie et le système étudié, et rassemblé un grand nombre de données et d'informations, l'inventaire du cycle de vie peut être construit [60].

a. L'inventaire du cycle de vie

Le tableau ci-dessous reprend les entrées et sorties de chaque sous-système qui structurent l'ACV de l'eau dans la production de bioéthanol. Il faut connaître la quantité d'eau en entrée et en sortie afin

de déterminer l'eau consommée dans le système mais également, la qualité de cette eau en sortie due aux intrants de chaque sous-système afin d'en interpréter les impacts environnementaux.

Entrées	Sorties
Système « Culture »	
Pluie m ³ /ha Irrigation m ³ /ha Semence kg/ha N kg/ha P₂O₅ kg/ha K₂O kg/ha Insecticide kg/ha Herbicide kg/ha Fongicide kg/ha	Evapotranspiration m ³ /ha Infiltration m ³ /ha Ruissellement m ³ /ha Transfert de polluants (air, eau, sol) kg/ha Erosion (tare terre) kg/ha Betterave ou Maïs kg/ha Perte à l'irrigation m ³ /ha
Système « Process »	
Prélèvements (souterrain, superficielle) litre/litre bioéthanol Détournement eau de surface litre/litre bioéthanol Intrants du procédé (acide sulfurique, chaux...) kg/litre bioéthanol Betterave ou Maïs kg/litre bioéthanol	Eau rejetée (souterrain, superficielle, direct ou STEP) litre/litre bioéthanol Evaporation litre/litre bioéthanol Transfert de polluants kg/litre bioéthanol Coproduits kg/litre bioéthanol Bioéthanol litre

Tableau 24 Entrées et sorties de l'ACV de l'eau dans la production de bioéthanol.

Les unités présentées dans ce tableau sont les unités propres à chaque entrée et sortie pour chaque sous-système. Par la suite, les unités du système « culture » sont toutes ramenées par litre de bioéthanol à 99,8% grâce aux rendements culture/hectare (kg/ha) et culture/bioéthanol (kg/L).

Les transferts de polluants dans le système « culture » sont répartis également sur l'année pour l'azote, le phosphore et le potassium. Par contre, les émissions des pesticides sont mises seulement pour le mois où a eu lieu l'application, lorsque celle-ci est une pulvérisation.

Chaque ICV est présenté en annexe 5 (Tableau 33, Tableau 34 et Tableau 35). Il faut tout de même noter le peu de données concernant les rejets polluants lors du procédé industriel.

b. L'évaluation des impacts environnementaux

Pour l'évaluation des impacts environnementaux, la méthode utilisée est ReCiPe 2008 mais restreinte aux « midpoints ». En effet, la ressource eau n'est pas représentée dans le « endpoint » : « dommages sur les ressources » (Annexe 2 Tableau 30). De plus, les « endpoints » présentent des valeurs qui sont difficilement appréciables et pertinentes à l'échelle d'un bassin versant. Représenter les différents dommages (sur la santé humaine en année équivalente de vie perdue, sur les écosystèmes en pourcentage d'espèces disparues et sur les ressources en frais supplémentaires ou en surplus énergétiques nécessaires à l'extraction de ces ressources), ne permettent pas d'apprécier

correctement la situation du bassin versant, de préciser les risques, les populations et espèces touchées et la durabilité des ressources.

Les catégories d'impacts intermédiaires de ReCiPe 2008 déjà répertoriées dans la Figure 2 sont reprises pour la méthodologie. Cela permettra d'être plus précis et donc, d'identifier mieux les impacts environnementaux mis en jeu.

L'amélioration se fera sur les indicateurs de l'eau en ajoutant des indicateurs pour le territoire et pour la ressource.

- Indicateurs pour le territoire : les consommations d'eau de la culture et de l'industrie sont rapportées au total des précipitations de la zone étudiée. Ceci permettra de déterminer des stress hydrique engendré par le système est ainsi, d'élaborer une note sur le territoire.

Un autre indicateur qui compare les prélèvements de l'activité en question par rapport aux prélèvements du territoire étudiée permettra de positionnée l'activité par rapport aux autres usages du territoire.

- Indicateurs pour les ressources :

L'eau souterraine est analysée en rapportant les prélèvements effectués par le système sur la recharge annuelle de la nappe concernée.

Pour l'eau superficielle, il faut déterminer l'impact des prélèvements et des rejets sur le débit mensuel et le débit d'étiage des cours d'eau. L'aspect qualitatif des rejets et des pollutions est pris en compte grâce aux « midpoints » et aussi, grâce aux grilles d'évaluation du SEQ-Eau qui couple une gamme de couleurs et d'état des cours d'eau en fonction des teneurs en polluants et de paramètres physico-chimiques (DCO, DBO, température, pH, métaux, matières actives...) [61].

Les impacts environnementaux sont uniquement issus de la filière agricole lors de l'analyse par Simapro et sont présentés annexe 6 (Tableau 36, Tableau 37 et Tableau 38). L'utilisation des termes « procédé indirect » et « procédé direct » a pour but de bien différencier l'agriculture pour le procédé indirect et l'agriculture pour le procédé direct, ce qui revient juste à une moindre quantité de betteraves donc, à une surface plus réduite pour le procédé direct.

En comparant le bilan annuel de ces trois tableaux, la culture du maïs a des impacts plus faibles, sur l'écotoxicité de l'eau douce, celle des océans, ou sur celle des écosystèmes terrestres. Ceci est dû aux pesticides utilisés sur la parcelle. En effet, la matière active épandue sur la parcelle de maïs est

relativement moins polluante que la matière active épandue sur la betterave. La métamitrone est la matière active ayant le plus d'impact en raison de sa teneur (2,7kg/ha).

Pour les autres « midpoint », c'est le procédé direct de la betterave avec le moins d'impact sur le changement climatique, la toxicité humaine, l'acidification et l'eutrophisation. Ceci est dû au fait que les quantités en azote et phosphore dans un hectare de maïs sont quasiment le triple de celles pour un hectare de betterave. Cependant, la surface nécessaire pour produire un litre de bioéthanol à 99,8% avec du maïs grain est nettement inférieure que pour le procédé indirect de betterave. Ainsi, la culture pour le procédé indirect est le système ayant le plus d'impacts environnementaux.

Cependant, il faut souligner que le procédé indirect correspond à une valorisation des déchets (fermentation des mélasses) de la filière sucrière. Par conséquent, les impacts de la culture du procédé indirect ne sont pas pris en compte dans le système. Pour conclure uniquement sur les impacts de la culture, la filière indirecte permettant de produire du bioéthanol à partir de mélasse présente le moins d'impacts environnementaux devant le maïs et le procédé direct. Le procédé betterave-direct a des impacts dans les trois « midpoints » d'écotoxicité contrairement au maïs et montre des contributions au changement climatique, à la toxicité humaine, à l'acidification des océans et à l'eutrophisation plus faible que le maïs.

c. Le bilan de l'usage de l'eau

Le bilan de l'usage de l'eau comprend les deux sous-systèmes (culture et procédé) et est présenté annexe 7 (Tableau 39, Tableau 40 et Tableau 41).

Les trois tableaux représentent l'usage de l'eau nécessaire pour produire un litre de bioéthanol à 99,8%, étalé sur un an et découpé mois par mois. Les définitions et les descriptions de chaque ligne sont regroupées dans le Tableau 25.

Tableau 25 Définitions et descriptions des tableaux représentant le bilan de l'usage de l'eau

Lignes	Définitions	Descriptons
Précipitation m ³ /litre de bioéthanol	Données obtenues par mois	
Infiltration m ³ /litre de bioéthanol	131 mm pour la Lys 375 mm pour la Drôme	Répartie sur 6 mois de l'année (automne-hiver) sauf pour le maïs (pas assez de précipitations)
Ruissellement avant usage m ³ /litre de bioéthanol	=Précipitation-Infiltration	
Evapotranspiration maximale m ³ /litre de bioéthanol	Voir définition de l'ETM page 25	Données obtenues par décade et additionnées pour chaque mois
Taux de satisfaction du besoin en irrigation	Proportion d'eau effectivement voulue par l'irrigant par rapport à celle nécessaire pour les plantes pour leur production maximum.	Choix de prendre un taux de satisfaction de 100% (en 2007 la Drôme était au niveau « vigilance » concernant la sécheresse mais ce niveau ne touche pas l'agriculture et l'irrigation) [63]
Irrigation effective m ³ /litre de bioéthanol	=MAX(0;((Evatranspiration maximale*Taux de satisfaction du besoin en irrigation)-Précipitation))	Si la précipitation suffit à l'ETM, alors l'irrigation n'est pas nécessaire.
Evapotranspiration réelle m ³ /litre de bioéthanol	=MIN((Evatranspiration maximale*Taux de satisfaction du besoin en irrigation) Ruissellement avant usage+Irrigation effective	Le ruissellement est une source de l'évapotranspiration (transpiration par le sol)
Eau prélevée pour l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	=Irrigation effective/(1-Taux perte de réseau-Taux de perte par évaporation)	Lors de l'irrigation, il y a des fuites (10% de l'irrigation effective) et de l'évaporation et dérive (15% de l'irrigation effective pour le maïs et 5% de l'irrigation effective pour la betterave)
Eau consommée par l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	=Irrigation effective*(1+Taux de perte par évaporation)	L'évapotranspiration est ici considérée comme une consommation, alors que l'eau perdue par une fuite de réseau revient à la ressource par infiltration ou ruissellement
Eau consommée process (évaporation) m ³ /litre de bioéthanol	<p>Il s'agit uniquement de l'eau évaporée car l'eau rejetée est considérée comme retournant à la ressource (après traitement).</p> <p>Pour le maïs, nous ne connaissons que l'eau consommée. Ainsi, on considère l'eau prélevée équivalente. Pour la betterave, comme nous avons recréé un procédé entier dont nous possédons plus d'informations : l'eau rejetée et l'eau consommée sont distinctes.</p> <p>L'eau du procédé (prélevée et consommée) est répartie sur l'année équitablement sur les douze mois pour le maïs et répartie sur les mois d'ouverture de l'usine TEREOS de Lillers pour la betterave.</p>	
Eau prélevée pour le procédé m ³ /litre de bioéthanol		
Total d'eau consommée en m ³ /litre de bioéthanol	Somme de l'eau consommée dans la culture (irrigation) et le procédé	
Total eau prélevée en m ³ /litre de bioéthanol	Somme de l'eau prélevée dans la culture (irrigation) et le procédé	
Pourcentage d'eau prélevée/ressources renouvelables	=Total eau prélevée/Précipitation	
Pourcentage d'eau consommée/ressources renouvelables	=Total eau consommée/Précipitation	

La première observation est que le coût en eau le plus important dans le bilan est celui de la culture (irrigation) et ce, pour les trois systèmes étudiés. Cette analyse se confirme en comparant le bilan du procédé direct et indirect de la betterave. En effet, les valeurs annuelles du « Pourcentage d'eau prélevée/ressources renouvelable » (7,93% pour l'indirect et 7,85% pour le direct) et du « Pourcentage d'eau consommée/ressources renouvelables » - ou WEI+ - (6,44% pour l'indirect et 6,65% pour le direct) des deux tableaux sont quasiment identiques. Ceci s'explique par l'approche que nous avons choisie : ramener tout en litre de bioéthanol en utilisant la quantité de betterave utilisée et le rendement à l'hectare. Ainsi, le ratio reste le même pour la culture et la légère différence observée entre ces deux systèmes est due à l'eau du procédé (cf. Tableau 26).

Tableau 26 Ratio de l'usage de l'eau sur les ressources renouvelables pour la culture et le procédé

		Procédé indirect	Procédé direct	Maïs
Culture	Pourcentage eau prélevée pour l'irrigation/ressources renouvelables	5,7%	5,7%	55,8%
	Pourcentage eau consommée par l'irrigation/ressources renouvelables	5,1%	5,1%	48,2%
Procédé	Pourcentage eau consommée process (évaporation) /ressources renouvelables	1,4%	1,6%	2%
	Pourcentage eau prélevée pour le procédé/ressources renouvelables	2,3%	2,2%	2%

La quantité d'eau plus importante dans la culture que dans le procédé se retrouve de manière plus marquante pour le système du maïs.

La deuxième observation est que la culture du maïs a un bilan hydrique nettement supérieur que la betterave. L'irrigation effective est plus forte pour le maïs et le fait que la précipitation en Drôme est plus faible que dans le bassin de la Lys accentue l'effet sur les ressources renouvelables. Le maïs consomme 56% des ressources alors que la betterave n'est seulement qu'à environ 8% annuellement. En s'intéressant à l'échelle mensuelle (cf. annexe 5), le maïs connaît des périodes de stress hydrique sur trois mois de l'année (juillet, août, octobre où le pourcentage est supérieur à 100%). Cependant, il faut rappeler que l'analyse ne comptabilise pas les réserves en eau faites les mois précédents (le renouvellement de la ressource). Cela ne signifie en aucun cas qu'il n'y a plus d'eau dans la zone étudiée : ces pourcentages montrent que la précipitation n'est pas suffisante pour

les besoins de la culture ce qui nécessite de puiser dans les ressources souterraines et/ou superficielles. Certes, dans l'absolu, le maïs prélève et consomme moins d'eau (1,556 m³) que le procédé indirect (1,714 m³), mais ces effets ont de plus grandes répercussions sur la ressource en eau.

Pour conclure sur l'usage de l'eau dans les trois filières de production du bioéthanol, c'est le procédé direct de la betterave qui utilise le moins la ressource en eau, suivi du procédé indirect et enfin le procédé du maïs.

En général, il est à noter que la production de bioéthanol à 99,8% à partir de betterave est plus avantageuse qu'à partir de maïs pour la durabilité de la ressource en eau. Cependant, il faut nuancer ces propos car il manque l'impact environnemental du procédé industriel.

Le stress hydrique doit être évalué sur l'année en raison de l'inertie des flux dans l'environnement et dans les ouvrages de stockage. Il est calculé grâce à l'équation suivante (WEI+), les précipitations étant utilisées pour approximer les ressources renouvelables disponibles :

$$\text{Stress hydrique} = \frac{\text{Consommations}_{\text{système}}}{\text{Précipitations}_{\text{zone d'étude}}}$$

L'indicateur du territoire, noté IT dans l'étude, détermine la part relative consommée par l'activité par rapport aux autres usages du même territoire.

$$IT = \frac{\text{Prélèvements}_{\text{système}}}{\text{Prélèvements}_{\text{zone d'étude}}}$$

Le Tableau 27 présente le calcul et les résultats du stress hydrique et de l'indicateur IT pour les trois filières. La dernière colonne du tableau est basée sur une extrapolation de la surface réelle en maïs (10,2% de la SAU) dans l'hypothèse où l'ensemble des surfaces cultivées de la zone d'étude (soit 17080 ha [11]) est dédié à la production de cette céréale (impact sur l'occupation des terres agricoles).

Tableau 27 Calcul du stress hydrique et de l'indice IT pour les trois filières de production et pour une extrapolation sur l'occupation du territoire agricole

Filière	Betterave procédé indirect	Betterave procédé direct	Maïs (10,2% des surfaces cultivées : 1738ha)	Maïs (100% des surfaces cultivées : 17080 ha)
Prélèvements pour un litre de bioéthanol	0,946 m ³	0,107 m ³	0,835 m ³	0,835 m ³
Production annuelle en bioéthanol de la zone d'étude	5 983 m ³	52 517 m ³	8 221 m ³	80 793 m ³
Prélèvements de la production de bioéthanol sur l'année	5 659 918 m ³	5 619 319 m ³	6 782 325 m ³	66 654 225 m ³
Total des prélèvements sur les zones étudiées pour l'année 2007	73 988 144 m ³	73 988 144 m ³	8 601 770 m ³	68 473 670 m ³
IT en pourcentage	7,6 %	7,6 %	79 %	97 %
Consommations pour un litre de bioéthanol	0,768 m ³	0,090 m ³	0,721 m ³	0,721 m ³
Consommations de la production de bioéthanol sur l'année	4 594 944 m ³	4 726 530 m ³	5 927 341 m ³	58 251 753 m ³
Superficie de la zone d'étude	183 700 ha	183 700 ha	59 000 ha	59 000 ha
Précipitation annuelle sur un hectare de la zone étudiée	9332 m ³ /ha	9332 m ³ /ha	7050 m ³ /ha	7050 m ³ /ha
Précipitation annuelle sur la zone étudiée	1 714 288 400 m ³	1 714 288 400 m ³	415 950 000 m ³	415 950 000 m ³
Stress hydrique	0,27 %	0,28 %	1,4 %	14 %

L'indicateur, noté IT dans cette étude, permet d'observer une réelle différence entre la production d'éthanol à partir de la betterave et celle à partir du maïs. Le positionnement de l'activité à partir de la betterave est envisageable dans le S.A.G.E de la Lys avec une part de 7,6 % des prélèvements totaux du territoire. Par contre l'activité à partir du maïs représente une part colossale (79% avec les surfaces cultivées existantes en maïs et 97% avec l'extrapolation) des prélèvements déjà existants sur la partie aval du bassin versant. La compétition entre les usages est trop forte et ceci n'est pas envisageable.

L'indicateur de stress hydrique renforce cette idée. Certes, la précipitation sur la totalité du territoire étudié suffit à pourvoir aux besoins de tous les systèmes (les résultats sont inférieurs à 15%). Mais ceci est trop élevé pour le maïs, en particulier pour l'extrapolation, car nécessiter 14% des précipitations laisse peu de ressource pour les autres activités et pour les milieux aquatiques qui protègent tout un écosystème.

Il faut aussi souligner que l'eau dans le procédé industriel est très approximative et donc que le stress hydrique et l'indicateur IT sont sûrement minimisés. Les procédés direct et indirect de la betterave ont un stress hydrique et un indicateur IT semblables, mais nous constatons que le procédé direct produit environ dix fois plus de bioéthanol que le procédé indirect, mais naturellement sans production de sucre. Le procédé direct à partir de betterave en zone tempérée est donc la filière la plus intéressante d'un point de vue de la durabilité de l'usage de l'eau et du rendement betterave/bioéthanol pour la production exclusive de bioéthanol.

VIII. Conclusion

L'analyse du cycle de vie est une méthode bien connue et largement utilisée dans l'évaluation des impacts environnementaux. Elle reste cependant insuffisante dans son approche sur la ressource en eau. La méthodologie employée ici tente de palier à ce défaut.

La difficulté majeure dans ce type d'approche méthodologique rencontrée reste la qualité et la disponibilité des données. L'accessibilité des données, leur homogénéisation et leur incertitude empêche la réalisation d'un inventaire du cycle de vie complet et fiable [4]. Cette étude le prouve par l'absence de modélisation des impacts environnementaux des procédés industriels et des bases de données souvent non concordantes et peu transparentes (Ecoinvent). Ceci entraîne des hypothèses et des approximations parfois maladroites (émissions polluantes).

Comme il a été rappelé en introduction, l'eau est une ressource et un milieu complexe à modéliser et à analyser à cause de ses fluctuations dans le temps et l'espace [7]. Elle est impossible à « fixer » comme d'autres ressources (pétrole, gaz...). Il y a de nombreux facteurs à prendre en compte pour analyser la durabilité de l'usage de l'eau : le climat, la topographie, les propriétés physiques du sol, les prélèvements, le renouvellement de la ressource, l'hydrosolubilité et l'affinité avec le sol des matières actives et autres composants (NPK), l'érosion des sols, l'évapotranspiration, l'aménagement du territoire, la compétition entre les différents usages, etc. Ces facteurs sont difficiles à obtenir dans la littérature – ou même tout simplement à réduire à une seule métrique - et bien qu'il existe pour

certaines des modélisations, elles restent soit restrictives et souvent à une échelle d'un pays ou de la planète, soit pointues et demandent un approfondissement de l'inventaire impossible à obtenir sans une étude de terrain. Ces dernières sont généralement réalisées pour des zones d'étude très restreintes et ne peuvent être utilisées à une échelle de bassin versant. Ainsi, l'approximation reste une alternative incontournable dans ce type d'approche méthodologique.

L'innovation de cette étude se détache en quatre points :

- Par l'approche dans le temps et l'espace : l'échelle du bassin versant est une échelle intéressante (et particulièrement en France) car il existe des réseaux, agences et associations collectant des données et étudiant ces zones en particuliers. L'approche mensuelle permet de mieux identifier les stress hydriques de la zone étudiée et de bien caler et relier l'itinéraire technique (développement de la culture) avec le procédé industriel (ouverture et fermeture de l'usine) et les précipitations (saison, période de sécheresse, période de crue). Cette vision mensuelle connecte les différents sous-systèmes entre eux et aide à mieux analyser les impacts et les usages de l'eau.
- Par l'exhaustivité des critères et du périmètre d'étude : l'approche a été faite dans l'idée de prendre l'ensemble des entrées et sorties d'eau et de polluants directes. Le périmètre a été défini plus précisément afin d'homogénéiser la zone d'étude et d'obtenir un système homogène. L'unité fonctionnelle d'un litre de bioéthanol à 99,8% ramenée sur un an permet d'observer les « dépenses » en eau du système et les impacts pour un litre en facilitant le passage avec une autre unité fonctionnelle (1000 litres de bioéthanol).
- Par la méthode de collecte des données : les données sont issues en majorité de la littérature. Elles ont été recoupées et comparées entre elle tout en gardant un regard critique. Le manque de données sur les procédés industriels a été pallié (seulement pour la betterave) par la modélisation de procédé grâce à un recoupement de sources. La prise de contact avec les autorités, les industriels, les agences de l'eau et les chambres d'agriculture a été un moyen de conforter certaines données de ce rapport.
- Par l'analyse du cycle de vie proposée : le bilan en eau rend cette méthode plus complète dans l'analyse quantitative au niveau de la ressource (déplétion), du milieu (écosystème) et du territoire (stress hydrique, prélèvement).

Les améliorations et perspectives à envisager seraient de conforter les données déjà acquises (procédé indirect et direct, itinéraires techniques), d'obtenir les procédés industriels (maïs) et leurs émissions polluantes car sans ces données, la méthodologie reste que partiellement applicable.

L'exhaustivité des données peut être encore approfondie (eau utilisée pour l'épandage de pesticides).

Il ressort enfin que la comparaison des notes d'incidence environnementale de filières différentes reste difficile dans le principe, car d'une part une filière n'est pas transposable nécessairement d'un territoire à l'autre (la betterave manquerait d'eau et serait échaudée en Drôme, tandis que le maïs manquerait de soleil et de chaleur dans le Nord), et d'autre part une filière peut valoriser des biens ou des activités externes à l'analyse (comme la filière indirecte, qui produit essentiellement du sucre, mais on peut considérer d'autres bienfaits économiques, culturels ou encore paysagers).

IX. Annexes

1) Liste des communes de chaque zone étudiée

Tableau 28 Liste des communes composants la SAGE de la Lys (1 commune manque sur les 225)

Aire-sur-la-Lys	Dennebroeucq	Houchin	Ourton
Aix-Noulette	Diéval	Houdain	Pérenches
Allouagne	Divion	Houplines	Pernes
Ames	Dohem	Illies	Pradelles
Amettes	Douvrin	Inghem	Prédefin
Annequin	Drouvin-le-Marais	Isbergues	Premesques
Annezin	Ecquedecques	La Bassée	Pressy
Armentières	Ecques	La Chapelle-d'Armentiers	Quernes
Aubers	Eecke	La Comté	Quiestède
Auchel	Englos	La Couture	Racquingham
Auchy-au-Bois	Enguinegatte	La Gorgue	Radinghem
Auchy-les-Mines	Ennetieres-en-Weppes	La Thieuloye	Radinghem-en-Weppes
Audincthun	Enquin-les-Mines	Labourse	Rebecques
Aumerval	Erny-Saint-Julien	Labreuvière	Rebreuve Ranchicourt
Bailleul	Erquinghem-Lys	Laires	Reclingham
Bailleul-lès-Pernes	Escobecques	Lambres	Rély
Bajus	Essars	Lapugnoy	Richebourg
Barlin	Estaires	Laventie	Robecq
Beaumetz-lès-Aire	Estrée-Blanche	Le Doulieu	Rombly
Berthen	Estrée-Cauchy	Le Maisnil	Roquetoire
Béthonsart	Febvin-Palfart	Lespesses	Ruitz
Bethune	Ferfay	Lestrem	Sachin
Beugin	Festubert	Lières	Sailly-Labourse
Beuvry	Fléchin	Liettres	Sailly-sur-la-Lys
Billy-Berclau	Flêtre	Ligny-les-Aire	Sains-en-Gohelle
Blaringhem	Fleurbaix	Lillers	Sains-lès-Pernes
Blessy	Floringhem	Lisbourg	Saint-Floris
Boeschepe	Fontaine-les-Hermans	Locon	Saint-Hilaire-Cottes
Boëseghem	Fouquereuil	Lorgies	Saint-Jans-Cappel
Bois Grenier	Fouquières-les-Béthune	Lozinghem	Saint-Venant
Bomy	Fournes en Weppes	Lugy	Senlis
Borre	Frelinghien	Magnicourt-en-Comté	Sercus
Bourecq	Fresnicourt-le-Dolmen	Mainil-les-Ruitz	Servins
Bours	Fréwillers	Mametz	Staple
Bouvigny-Boyeffles	Fromelles	Marest	Steenbecque
Bruay-La-Buissière	Fruges	Marles-les-Mines	Steenwerck

Bully-les-Mines	Gauchin-Légal	Matringhem	Strazeele
Burbure	Givenchy-lès-la-Bassée	Mazingarbe	Tangry
Busnes	Gonnehem	Mazinghem	Thérouanne
Caëstre	Gosnay	Mencas	Thiennes
Calonne-Ricouart	Grenay	Merris	Valhuon
Calonne-sur-la-Lys	Guarbecque	Merville	Vaudricourt
Camblain-Châtelain	Haillicourt	Méteren	Vendin-les-Béthune
Cambrin	Haisnes	Mingoval	Verchin
Campagne-lès-Wardrecques	Ham-en-Artois	Monchy Breton	Vermelles
Canlers	Haverskerques	Mont-Bernanchon	Verquigneul
Cauchy-à-la-Tour	Hazebrouck	Morbecque	Verquin
Caucourt	Herbelles	Nédon	Vieille-Chapelle
Chelers	Herlies	Nédonchel	Vieux Berquin
Chocques	Hermin	Neuf Berquin	Vincly
Clarques	Hersin-Coupigny	Neuve-Chapelle	Violaines
Coupelle-Neuve	Hesdigneul	Nieppe	Wallon Cappel
Coupelle-Vieille	Heuringhem	Noeux-lès-Mines	Wardrecques
Coyecques	Hézecques	Norrent-Fontes	Westrehem
Cuinchy	Hinges	Noyelles-les-Vermelles	Witternesse
Delettes	Hondeghem	Oblinghem	Wittes

Tableau 29 Liste des communes composants la zone aval du bassin versant de la Drôme

Allex	Eurre	Montclar-Sur-Gervanne
Aouste-Sur-Sye	Eygluy-Escoulin	Omlèze
Aubenasson	Gigors-Et-Lozeron	Piegros-La-Clastre
Autichamp	Grane	Plan-De-Baix
Beaufort-Sur-Gervanne	La Repara-Auriples	Saillans
Chabrillan	La Roche-Sur-Grane	Saint-Sauveur-En-Diois
Chastel-Arnaud	Le Chaffal	Suze
Cobonne	Livron-Sur-Drome	Vaunaveys-La-Rochette
Crest	Loriol-Sur-Drome	Véronne
Divajeu	Mirabel-Et-Blacons	

2) Les connexions entre « midpoints » et « endpoints » dans la méthode ReCiPe 2008

Midpoint impact category		Endpoint impact category*		
Name	abbr.	HH	ED	RA
climate change	CC	+	+	
ozone depletion	OD	+	–	
terrestrial acidification	TA		+	
freshwater eutrophication	FE		+	
marine eutrophication	ME		–	
human toxicity	HT	+		
photochemical oxidant formation	POF	+	–	
particulate matter formation	PMF	+		
terrestrial ecotoxicity	TET		+	
freshwater ecotoxicity	FET		+	
marine ecotoxicity	MET		+	
ionising radiation	IR	+		
agricultural land occupation	ALO		+	–
urban land occupation	ULO		+	–
natural land transformation	NLT		+	–
water depletion	WD			–
mineral resource depletion	MRD			+
fossil fuel depletion	FD			+

* Legend: + means that a quantitative connection has been established for this link in ReCiPe 2008; – means that although this is an important link, no quantitative connection could be established.

Tableau 30 Connexions entre les "midpoints" et les "endpoints" [Rapport ReCiPe 2008]

3) Les ICV des cultures issus d'EcoInvent

Tableau 31 Bilan matière d'une culture de maïs pour un hectare avec un rendement de 11,4 tonnes/ha [EcoInvent]

Entrées en kg (sauf exception en rouge)	1kg maïs grain	1ha (rendement 11,4t/ha)
Occupation, arable m ²	0,62623	7139,022
Acetamide-anillide-compound, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U	1,01797E-05	0,11604858
Phenoxy-compound {GLO} market for Alloc Def, U	2,48836E-06	0,028367293
Lime {GLO} market for Alloc Def, U	0,030409	346,6626
Bipyridylum-compound {GLO} market for Alloc Def, U	6,1367E-07	0,006995838
Urea, as N {GLO} market for Alloc Def, U	0,003543	40,3902
Atrazine {GLO} market for Alloc Def, U	0,00009246	1,054044
Metolachlor {GLO} market for Alloc Def, U	0,000042885	0,488889
Triazine-compound, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U	2,4306E-06	0,02770884
Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U	0,000062763	0,7154982
Pyrethroid-compound {GLO} market for Alloc Def, U	1,2297E-06	0,01401858
Maize seed, for sowing {GLO} market for Alloc Def, U	0,021471	244,7694
Potassium chloride, as K2O {GLO} market for Alloc Def, U	0,007193	82,0002
Diphenylether-compound {GLO} market for Alloc Def, U	1,9252E-07	0,002194728

Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO} market for Alloc Def, U		0,005848	66,6672
Cyclic N-compound {GLO} market for Alloc Def, U		5,7757E-07	0,006584298
Nitrile-compound {GLO} market for Alloc Def, U		9,3855E-07	0,01069947
Benzoic-compound {GLO} market for Alloc Def, U		1,7327E-06	0,01975278
Glyphosate {GLO} market for Alloc Def, U		0,000019662	0,2241468
Organophosphorus-compound, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U		9,7104E-06	0,11069856
Ammonium nitrate, as N {GLO} market for Alloc Def, U		0,0048927	55,77678
Dinitroaniline-compound {GLO} market for Alloc Def, U		2,4787E-06	0,02825718
[sulfonyl]urea-compound {GLO} market for Alloc Def, U		5,6313E-07	0,006419682
Ammonia, liquid {RER} market for Alloc Def, U		0,0084357	96,16698
Irrigation {BR} market for Alloc Def, U m ³		0,003023407	34,46684419
Irrigation {CH} market for Alloc Def, U m ³		5,56199E-06	0,063406735
Irrigation {CN} market for Alloc Def, U m ³		0,033808304	385,4146663
Irrigation {DE} market for Alloc Def, U m ³		0,00059886	6,827003122
Irrigation {ES} market for Alloc Def, U m ³		0,002046525	23,33038121
Irrigation {FR} market for Alloc Def, U m ³		0,000301757	3,440026711
Irrigation {IN} market for Alloc Def, U m ³		0,063490165	723,7878762
Irrigation {MY} market for Alloc Def, U m ³		0,000518415	5,909930383
Irrigation {PH} market for Alloc Def, U m ³		0,004534694	51,69551077
Irrigation {RoW} market for Alloc Def, U m ³		0,136415337	1555,134837
Sorties en kg (sauf exception en rouge)			
Emissions to air			
Nitrogen oxides		8,35174E-05	0,952098588
Ammonia		0,001018231	11,6078334
Water/m ³		0,170071928	1938,819978
Dinitrogen monoxide		0,000397702	4,5338028
Emissions to water			
Phosphate	River	7,5148E-06	0,08566872
Phosphorus	River	0,000097542	1,1119788
Water, RoW m ³	River	0,014934219	170,2501008
Nitrate	Gw	0,011639108	132,6858312
Water, RoW m ³	Gw	0,059736877	681,0004034
Emissions to soil			
Prosulfuron		2,1659E-08	0,000246913
Terbufos		2,6953E-06	0,03072642
Tefluthrin		7,9416E-07	0,009053424
Alachlor		4,1393E-06	0,04718802

Paraquat	6,1367E-07	0,006995838
Diflufenzopyr-sodium	1,9252E-07	0,002194728
Foramsulfuron	3,6098E-08	0,000411517
Tebupirimphos	1,0108E-06	0,01152312
Dicamba	1,7327E-06	0,01975278
Mesotrione	1,5643E-06	0,01783302
Nicosulfuron	2,6472E-07	0,003017808
Primisulfuron	1,2033E-07	0,001371762
Glufosinate	1,1912E-06	0,01357968
Flumetsulam	3,3692E-07	0,003840888
Zinc	-5,9001E-06	-0,06726114
Imazapyr	4,8131E-09	5,48693E-05
Cypermethrin	3,6098E-08	0,000411517
Chlorpyrifos	4,8131E-06	0,05486934
Imazethapyr	1,6846E-08	0,000192044
Atrazine	0,00009246	1,054044
Glyphosate	0,000019662	0,2241468
Acetochlor	0,000059442	0,6776388
Dimethenamid	5,0297E-06	0,05733858
Cyfluthrin	5,0538E-08	0,000576133
Simazine	2,4306E-06	0,02770884
Bifenthrin	2,1659E-07	0,002469126
Cadmium	-1,8835E-08	-0,000214719
Fipronil	2,8879E-07	0,003292206
2,4-D	3,0443E-06	0,03470502
Nickel	-3,2894E-07	-0,003749916
Chromium	4,4455E-08	0,000506787
Copper	-1,5041E-06	-0,01714674
Bromoxynil	6,4977E-07	0,007407378
Lead	2,6437E-07	0,003013818
Permethrin	1,0829E-07	0,001234506
Lambda-cyhalothrin	2,4065E-08	0,000274341
Pendimethalin	2,4787E-06	0,02825718
Isoxaflutole	5,7757E-07	0,006584298
Rimsulfuron	1,2033E-07	0,001371762
Metolachlor	0,000042885	0,488889
Acetamide	1,0108E-06	0,01152312

Tableau 32 Bilan matière d'une culture de betterave sucrière pour un hectare avec un rendement de 77,3 tonnes/ha [Ecolinvent]

Entrées en kg (sauf exception en rouge)		1kg betterave	1ha (rendement 77,3t/ha)
Nitrogen fertiliser, as N {GLO} market for Alloc Def, U		0,000150231	11,61287694
Triazine-compound, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U		2,58376E-05	1,997250247
Potassium chloride, as K2O {GLO} market for Alloc Def, U		0,00063868	49,36998415
Ammonium nitrate, as N {GLO} market for Alloc Def, U		0,000276416	21,36695047
Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO} market for Alloc Def, U		8,04044E-05	6,215261603
Sugar beet seed, for sowing {GLO} market for Alloc Def, U		2,68609E-05	2,076349571
Cyclic N-compound {GLO} market for Alloc Def, U		1,91863E-06	0,148310464
Irrigation {CH} market for Alloc Def, U m ³		0,005731577	443,0509354
Ammonium sulfate, as N {GLO} market for Alloc Def, U		2,09168E-05	1,616868785
Phosphate rock, as P2O5, beneficiated, dry {GLO} market for Alloc Def, U		2,54663E-05	1,968547572
Potassium sulfate, as K2O {GLO} market for Alloc Def, U		4,18929E-05	3,238320479
Urea, as N {GLO} market for Alloc Def, U		9,70737E-05	7,503796035
Benzimidazole-compound {GLO} market for Alloc Def, U		7,67456E-06	0,593243393
Pesticide, unspecified {GLO} market for Alloc Def, U		3,8795E-06	0,299885004
Liquid manure spreading, by vacuum tanker {GLO} market for Alloc Def, U m ³		0,000168021	12,98805675
Sorties (sauf exception en rouge)			
Emissions to air			
Water/m ³		0,001921798	148,5549786
Carbon dioxide, fossil		0,000152405	11,78091694
Ammonia		0,000203285	15,71392815
Dinitrogen monoxide		6,62639E-05	5,122198995
Nitrogen oxides		1,39154E-05	1,075661789
Emissions to water			
Cadmium	Gw	3,90E-10	3,01321E-05
Cadmium	River	2,82783E-10	2,18591E-05
Phosphate	Gw	1,65446E-06	0,127890034
Lead	River	1,28069E-08	0,00098997
Chromium	Gw	2,32243E-07	0,017952414
Zinc	Gw	3,35885E-07	0,025963908
Nitrate	Gw	0,002207392	170,6313815
Zinc	River	7,63226E-08	0,005899739
Lead	Gw	2,60837E-09	0,000201627
Copper	Gw	4,44779E-08	0,003438141
Nickel	Gw	2,49483E-12	1,92851E-07
Water, CH m ³	Gw	0,003047824	235,5967654
Copper	River	3,75208E-08	0,00290036
Phosphorus	River	1,08134E-06	0,083587811
Chromium	River	3,99155E-08	0,003085465

Phosphate	River	5,12951E-06	0,39651146
Mercury	Gw	1,40011E-10	1,08229E-05
Nickel	River	3,43964E-08	0,00265884
Mercury	River	1,3352E-10	1,03211E-05
Water, CH m ³	River	0,000761956	58,89919135
Emissions to soil			
Fenpropimorph		1,91863E-06	0,148310464
Metamitron		2,58376E-05	1,997250247
Phenmedipham		4,73264E-06	0,365832837
Lead		1,76908E-08	0,001367496
Copper		-1,85865E-06	-0,143673819
Cadmium		-4,23841E-08	-0,003276289
Fungicides, unspecified		3,2361E-07	0,025015084
Chlorothalonil		8,95365E-07	0,069211678
Chromium		-3,40674E-07	-0,026334072
Zinc		-2,52173E-06	-0,194929475
Mercury		-9,45874E-09	-0,000731161
Nickel		1,44601E-08	0,001117769
Ethofumesate		6,77919E-06	0,524031484
Metaldehyde		1,02328E-06	0,079099324

4) Les modélisations des procédés industriels

Figure 21 Le procédé industriel de la production de bioéthanol à partir de maïs

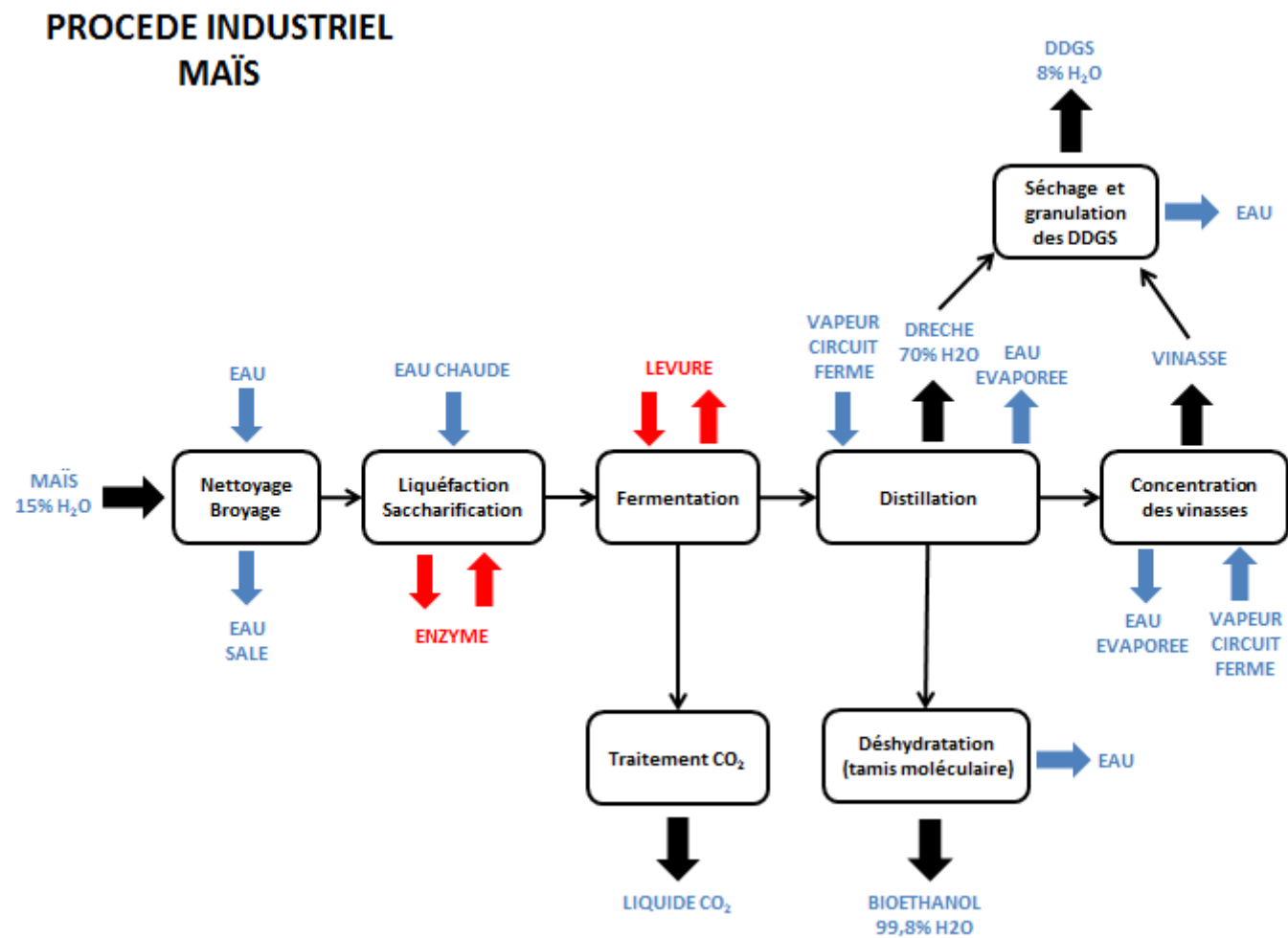
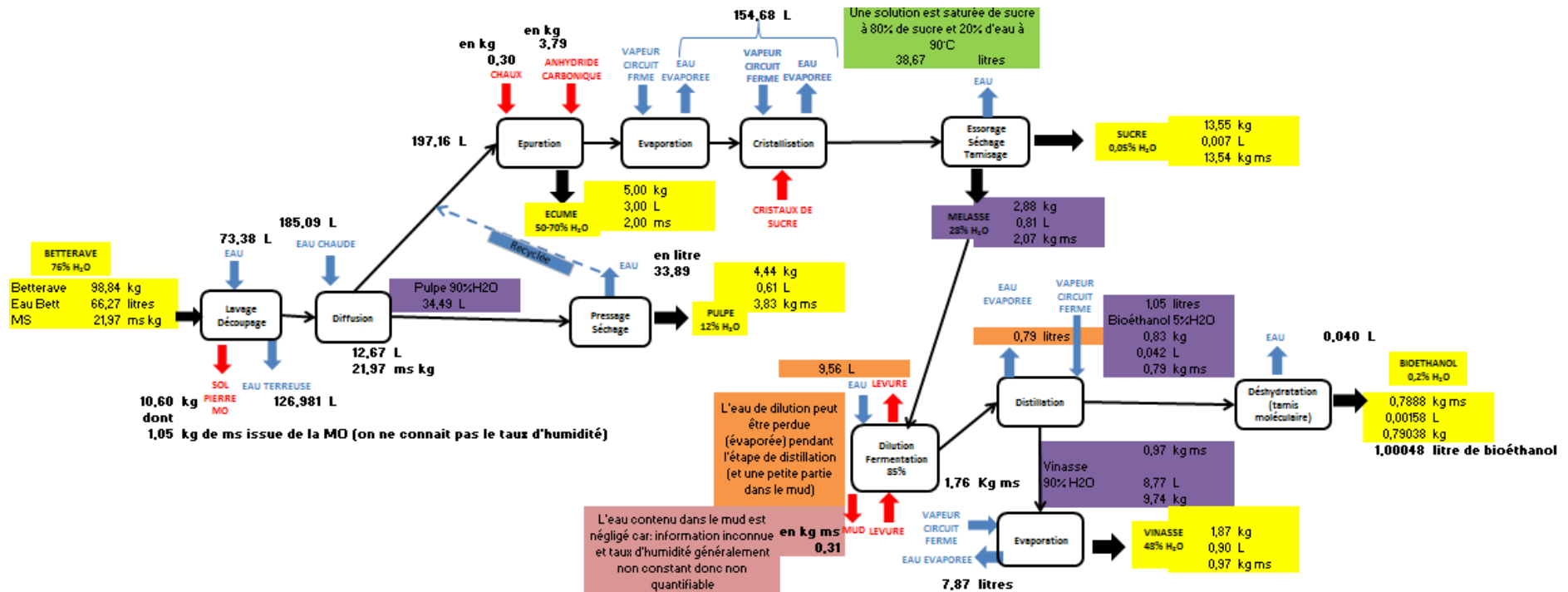
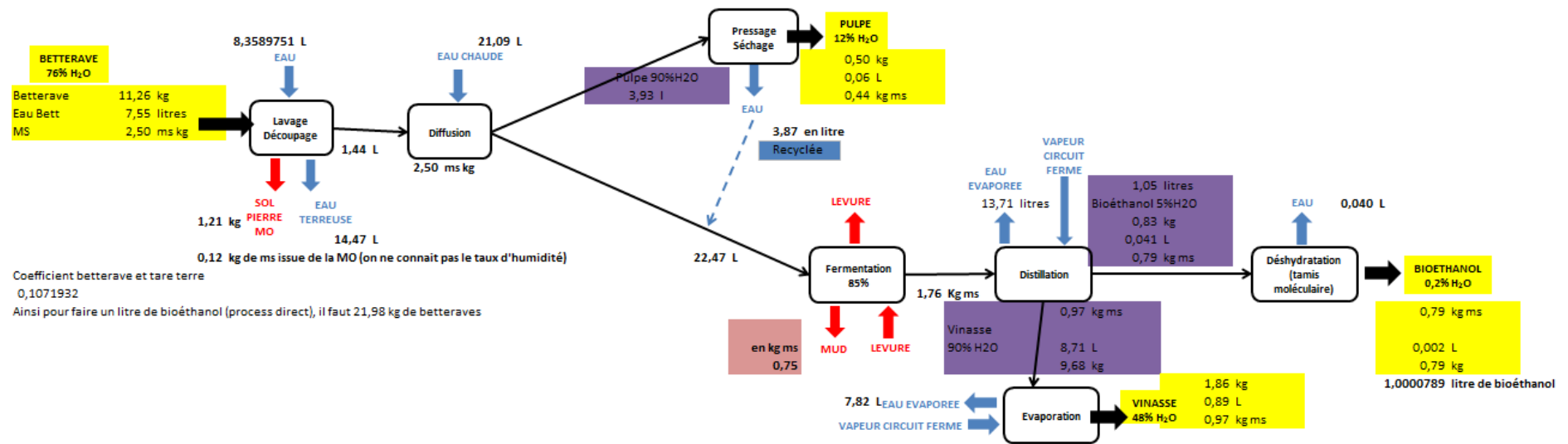


Figure 22 Le procédé industriel indirect de la production de bioéthanol à partir de betterave



Ce procédé a été modélisé à partir d'un article scientifique qui prend les entrées et sorties d'une usine basée en Slovénie. La modélisation est faite à partir de la matière sèche. La quantité de betterave, d'écumes, de pulpes déshydratées, de chaux, d'anhydre carbonique de sucre et de mélasse est obtenue grâce à l'article. La quantité de mélasse est issue d'une revue de l'ADEME [62]. Les taux d'humidité de chaque produits et coproduits sont obtenus par des données issues de TEREOS. L'efficacité de la fermentation est mise arbitrairement à 85%.

Figure 23 Le procédé industriel direct de la production de bioéthanol à partir de betterave



5) Les inventaires du cycle de vie pour le maïs et la betterave (procédé direct et procédé indirect)

Tableau 33 ICV du système maïs pour faire 1L de bioéthanol 99,8%

0,000211404	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Entrées												
Précipitation m³/litre de bioéthanol	0,098302632	0,096611404	0,123882456	0,110141228	0,234869298	0,244171053	0,071665789	0,078853509	0,110141228	0,011415789	0,242268421	0,06807193
Irrigation m³/litre de bioéthanol (eau superficielle)						0,295964912	0,295964912	0,295964912				
Semence kg/litre de bioéthanol				0,005707895								
N kg/litre de bioéthanol			0,041223684		0,038052632							
P2O5 kg/litre de bioéthanol			0,019026316									
K2O kg/litre de bioéthanol			0,069763158									
Insecticide kg m.a/litre de bioéthanol												
Téfluthrine				3,86868E-05								
Herbicide kg m.a/litre de bioéthanol												
Dimethenamid-p				0,000213095								
Mésotrione						3,17105E-05						
Fongicide kg m.a/litre de bioéthanol												
Sorties												
Evapotranspiration m³/litre de bioéthanol	0,009211908	0,015617434	0,039669868	0,063849145	0,102572982	0,267605132	0,392689945	0,28451477	0,163118947	0,032392303	0,018201842	0,008292303
Infiltration m³/litre de bioéthanol (plaine d’Allex 375mm/an)	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596	0,066063596

Transfert de polluants (air, eau, sol) kg/litre de bioéthanol												
Emission N ₂ O au champ (1,41%)	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05	9,32289E-05
Emission NH ₃ au champ (6,33%)	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579	0,000418579
Emission nitrates au champ (17,14%)	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123	0,001133123
Emission phosphate au champ (0,15%)	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06	4,86228E-06
Emission N _{ox} au champ (1%)	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05	6,55351E-05
Emission téfluthrine sol (50,20%)	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06	1,6184E-06
Emission dimethenamid- p sol (50,20%)	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06	8,91446E-06
Emission mésotrione sol (50,20%)	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06	1,32656E-06
Emission téfluthrine air (0,25%)	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09	8,05976E-09
Emission dimethenamid- p air (0,25%)				8,87895E-08	8,87895E-08							
Emission mésotrione air (0,25%)						7,92763E-08						
Emission N ₂ O air (2,97%)	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605	0,000196605
Emission NO _x air (9%)	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086	0,00046086
Emission NH ₃ air (4,75%)	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877	0,000312877
Emission téfluthrine eau (1,03%)	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08	3,32062E-08
Emission dimethenamid- p eau (1,03%)	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07	1,82906E-07
Emission mésotrione eau (1,03%)	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08	2,72182E-08
Emission nitrates eau (20,7%)	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781	0,001367781
Emission phosphore eau (12,8%)	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947	0,000202947

Maïs kg/litre de bioéthanol										2,41		
Perte à l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol (15% de l'irrigation)						0,044394737	0,044394737	0,044394737				

Tableau 34 ICV du système betterave et procédé indirect pour faire 1L de bioéthanol 99,8%

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Entrées												
Précipitation m ³ /litre de bioéthanol	1,067037257	1,168690298	1,007579819	0,03772031	1,001825873	1,770936611	2,03817542	0,722439845	0,82281423	0,592656404	0,639966624	1,062561966
Irrigation m ³ /litre de bioéthanol						0,473102199	0,473102199	0,473102199				
Semence kg/litre de bioéthanol			0,003324502									
N kg/litre de bioéthanol												0,230157827
P2O5 kg/litre de bioéthanol									0,04731022			
K2O kg/litre de bioéthanol									0,127865459			
Herbicide kg m.a/litre de bioéthanol												
Métamitron				0,003452367	0,000772307							
Ethofumesate				0,000255731								
Phenmédiphame				0,000204585	0,000383596							
Desmédiphame					0,000127865							
Fongicide kg m.a/litre de bioéthanol												
Azoxystrobine								0,000255731				
Difénoconazole								0,000159832				

Sorties												
Evapotranspiration m ³ /litre de bioéthanol	0,080171643	0,085669858	0,196912807	0,651261406	0,986652505	0,990829444	1,667791807	1,267146701	0,854141268	0,313696593	0,057411591	0,051146184
Infiltration m ³ /litre de bioéthanol (17% des pluies annuelles)	0,181402727	0,198677351	0,171288569	0,006418846	0,170316792	0,301059224	0,346489821	0,122814774	0,139884812	0,100757982	0,108800719	0,180673894
Transfert de polluants (air, eau, sol) kg/litre de bioéthanol												
Emission N ₂ O au champ (2,19%)	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628	0,000429628
Emission NH ₃ au champ (6,75%)	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408	0,001323408
Emission nitrates au champ (13,45%)	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422	0,002640422
Emission phosphate au champ (0,21%)	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06	8,31125E-06
Emission NO _x au champ (2%)	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547	0,000392547
Emission métamitronne sol (50%)	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028	0,000176028
Emission ethofumesate sol (50%)	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05
Emission phenmédiphame sol (50%)	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05	2,45075E-05
Emission desmédiphame sol (50%)	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06	5,32773E-06
Emission azoxystrobine sol (50%)	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05	1,06555E-05
Emission difénoconazole sol (50%)	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06	6,65966E-06
Emission métamitronne air (9,95%)				0,000343511	7,68446E-05							

Emission ethofumesate air (9,95%)				2,54452E-05								
Emission phenmédiphame air (9,95%)				2,03562E-05	3,81678E-05							
Emission desmédiphame air (9,95%)					1,27226E-05							
Emission azoxystrobine air (9,95%)								2,54452E-05				
Emission difénoconazole air (9,95%)								1,59033E-05				
Emission N ₂ O air (2,97%)	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788	0,000581788
Emission NO _x air (9%)	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543	0,001764543
Emission NH ₃ air (4,75%)	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418	0,000933418
Emission métamitron eau (1,02%)	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06	3,59097E-06
Emission ethofumesate eau (1,02%)	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07
Emission phenmédiphame eau (1,02%)	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07	4,99954E-07
Emission desmédiphame eau (1,02%)	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07	1,08686E-07
Emission azoxystrobine eau (1,02%)	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07	2,17371E-07
Emission difénoconazole eau (1,02%)	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07	1,35857E-07
Emission nitrates eau (20,7%)	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335	0,004053335
Emission phosphore eau (12,8%)	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069	0,000505069
Erosion (tare terre) (10% du poids) kg/litre									9,884			

de bioéthanol										
Betterave kg/litre de bioéthanol									98,84	

Tableau 35 ICV du système betterave direct pour faire 1L de bioéthanol 99,8%

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Entrées												
Précipitation m ³ /litre de bioéthanol	0,121558473	0,133138939	0,114784994	0,004297154	0,114129495	0,201747736	0,232191979	0,082301423	0,093736223	0,0675163	0,072905951	0,121048642
Irrigation m ³ /litre de bioéthanol						0,053896507	0,053896507	0,053896507				
Semence kg/litre de bioéthanol			0,000378732									
N kg/litre de bioéthanol												0,026219922
P2O5 kg/litre de bioéthanol									0,005389651			
K2O kg/litre de bioéthanol									0,014566624			
Herbicide kg m.a/litre de bioéthanol												
Métamitrone				0,000393299	8,79824E-05							
Ethofumesate				2,91332E-05								
Phenmédiphame				2,33066E-05	4,36999E-05							
Desmédiphame					1,45666E-05							
Fongicide kg m.a/litre de bioéthanol												
Azoxystrobine								2,91332E-05				
Difénoconazole								1,82083E-05				

Sorties												
Evapotranspiration m ³ /litre de bioéthanol	0,009133273	0,009759638	0,0224326	0,074192669	0,112400923	0,112876766	0,189997326	0,144355239	0,097305045	0,035736783	0,006540414	0,005826649
Infiltration m ³ /litre de bioéthanol (17% des pluies annuelles)	0,020665669	0,02263362	0,019513449	0,000731245	0,019402743	0,034297115	0,039472636	0,013991242	0,015935886	0,011478499	0,01239474	0,020582639
Transfert de polluants (air, eau, sol) kg/litre de bioéthanol												
Emission N ₂ O au champ (2,19%)	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05	4,89439E-05
Emission NH ₃ au champ (6,75%)	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765	0,000150765
Emission nitrates au champ (13,45%)	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801	0,000300801
Emission phosphate au champ (0,21%)	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07	9,46831E-07
Emission NO _x au champ (2%)	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05	4,47195E-05
Emission métamitronne sol (50%)	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05	2,00534E-05
Emission ethofumesate sol (50%)	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06
Emission phenmédiphame sol (50%)	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06	2,79194E-06
Emission desmédiphame sol (50%)	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07	6,06943E-07
Emission azoxystrobine sol (50%)	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06	1,21389E-06
Emission difénoconazole sol (50%)	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07	7,58678E-07
Emission métamitronne air (9,95%)				3,91332E-05	8,75425E-06							
Emission ethofumesate air (9,95%)				2,89876E-06								
Emission phenmédiphame air				2,31901E-06	4,34814E-06							

(9,95%)												
Emission desmédiaphame air (9,95%)					1,44938E-06							
Emission azoxystrobine air (9,95%)								2,89876E-06				
Emission difénoconazole air (9,95%)								1,81172E-06				
Emission N ₂ O air (2,97%)	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05	6,62781E-05
Emission NO _x air (9%)	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019	0,000201019
Emission NH ₃ air (4,75%)	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336	0,000106336
Emission métamitron eau (1,02%)	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07	4,09089E-07
Emission ethofumesate eau (1,02%)	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08
Emission phenmédiaphame eau (1,02%)	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08	5,69555E-08
Emission desmédiaphame eau (1,02%)	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08	1,23816E-08
Emission azoxystrobine eau (1,02%)	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08	2,47633E-08
Emission difénoconazole eau (1,02%)	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08	1,5477E-08
Emission nitrates eau (20,7%)	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762	0,000461762
Emission phosphore eau (12,8%)	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05	5,75382E-05
Erosion (tare terre) (10% du poids) kg/litre de bioéthanol									1,126			
Betterave kg/litre de bioéthanol									11,26			

6) Les impacts environnementaux de la filière agricole du maïs et de la betterave (procédé direct et procédé indirect) pour faire 1L de bioéthanol 99,8% via Simapro sur un an.

Tableau 36 Evaluation des impacts pour la production d'un litre de bioéthanol à 99,8% à partir de maïs sur un an d'après Simapro

CULTURE DU MAÏS	Unité	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	TOTAL SUR L'ANNEE
Changement climatique	kg CO ₂ eq	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	5,86E-02	7,03E-01
Toxicité humaine	kg 1,4-DB eq	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	5,85E-04	7,02E-03
Ecotoxicité d'eau douce	kg 1,4-DB eq	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Ecotoxicité d'eau de mer	kg 1,4-DB eq	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB eq	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Acidification	kg SO ₂ eq	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	7,31E-04	8,77E-03
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ eq	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	8,37E-04	1,00E-02

Tableau 37 Evaluation des impacts pour la production d'un litre de bioéthanol à 99,8% à partir de betterave (procédé indirect) sur un an d'après Simapro

CULTURE BETTERAVE PROCEDE INDIRECT	Unité	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	TOTAL SUR L'ANNEE
Changement climatique	kg CO ₂ éq	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	1,73E-01	2,08E+00
Toxicité humaine	kg 1,4-DB eq	2,21E-03	2,21E-03	2,21E-03	2,51E-03	2,28E-03	2,21E-03	2,21E-03	2,21E-03	2,21E-03	2,21E-03	2,21E-03	2,21E-03	2,69E-02
Ecotoxicité d'eau douce	kg 1,4-DB eq	3,47E-04	3,47E-04	3,47E-04	6,64E-04	4,18E-04	3,47E-04	3,47E-04	3,47E-04	3,47E-04	3,47E-04	3,47E-04	3,47E-04	4,55E-03
Ecotoxicité d'eau de mer	kg 1,4-DB eq	9,48E-07	9,48E-07	9,48E-07	8,61E-05	1,98E-05	9,48E-07	9,48E-07	9,48E-07	9,48E-07	9,48E-07	9,48E-07	9,48E-07	1,15E-04
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB eq	6,64E-06	6,64E-06	6,64E-06	1,31E-05	8,06E-06	6,64E-06	6,64E-06	6,64E-06	6,64E-06	6,64E-06	6,64E-06	6,64E-06	8,75E-05
Acidification	kg SO ₂ éq	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,38E-03	2,85E-02
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ éq	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,89E-02

Tableau 38 Evaluation des impacts pour la production d'un litre de bioéthanol à 99,8% à partir de betterave (procédé direct) sur un an d'après Simapro

CULTURE BETTERAVE PROCEDE DIRECT	Unité	Janvier	Fevrier	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	TOTAL SUR L'ANNEE
Changement climatique	kg CO ₂ éq	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02	2,37E-01
Toxicité humaine	kg 1,4-DB eq	2,52E-04	2,52E-04	2,52E-04	2,87E-04	2,60E-04	2,52E-04	2,52E-04	2,52E-04	2,52E-04	2,52E-04	2,52E-04	2,52E-04	3,07E-03
Ecotoxicité d'eau douce	kg 1,4-DB eq	3,95E-05	3,95E-05	3,95E-05	7,58E-05	4,74E-05	3,95E-05	3,95E-05	3,95E-05	3,95E-05	3,95E-05	3,95E-05	3,95E-05	5,18E-04
Ecotoxicité d'eau de mer	kg 1,4-DB eq	1,08E-07	1,08E-07	1,08E-07	9,80E-06	2,22E-06	1,08E-07	1,08E-07	1,08E-07	1,08E-07	1,08E-07	1,08E-07	1,08E-07	1,31E-05
Ecotoxicité terrestre	kg 1,4-DB eq	7,56E-07	7,56E-07	7,56E-07	1,49E-06	9,16E-07	7,56E-07	7,56E-07	7,56E-07	7,56E-07	7,56E-07	7,56E-07	7,56E-07	9,97E-06
Acidification	kg SO ₂ éq	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	2,71E-04	3,25E-03
Eutrophisation	kg PO ₄ ³⁻ éq	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	2,75E-04	3,30E-03

7) Le coût en eau pour la production d'un litre de bioéthanol à partir de maïs ou à partir de betterave (procédé indirect et procédé direct) sur un an.

Tableau 39 Le bilan de l'usage de l'eau pour produire un litre de bioéthanol à 99,8% à partir de maïs

MAÏS	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
Précipitation m ³ /litre de bioéthanol	0,098	0,097	0,124	0,110	0,235	0,244	0,072	0,079	0,110	0,011	0,242	0,068	1,490
Infiltration m ³ /litre de bioéthanol	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,011	0,071	0,068	0,793
Ruissellement avant usage m ³ /litre de bioéthanol	0,027	0,025	0,053	0,039	0,164	0,173	0,000	0,008	0,039	0,000	0,171	0,000	0,698
Evapotranspiration maximale m ³ /litre de bioéthanol	0,009	0,016	0,040	0,064	0,103	0,268	0,393	0,285	0,163	0,032	0,018	0,008	1,398
Taux de satisfaction du besoin en irrigation	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	5,000
Irrigation effective m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,023	0,321	0,206	0,053	0,021	0,000	0,000	0,624
Evapotranspiration réelle m ³ /litre de bioéthanol	0,027	0,025	0,053	0,039	0,164	0,196	0,321	0,213	0,092	0,021	0,171	0,000	1,322
Eau prélevée pour l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,428	0,274	0,071	0,028	0,000	0,000	0,832
Eau consommée par l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,369	0,237	0,061	0,024	0,000	0,000	0,718
Eau consommée process (évaporation) m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
Eau prélevée pour le procédé m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
Total d'eau consommée en m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,369	0,237	0,061	0,024	0,000	0,000	0,721
Total eau prélevée en m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,031	0,428	0,274	0,071	0,028	0,000	0,000	0,835
Pourcentage d'eau prélevée/ressources renouvelable	0,25%	0,26%	0,20%	0,23%	0,11%	12,90%	597,61%	348,07%	64,36%	247,19%	0,10%	0,37%	56,03%
Pourcentage d'eau consommée/ressources renouvelables	0,25%	0,26%	0,20%	0,23%	0,11%	11,14%	515,49%	300,25%	55,54%	213,50%	0,10%	0,37%	48,36%

Tableau 40 Le bilan de l'usage de l'eau pour produire un litre de bioéthanol à 99,8% à partir de betterave (procédé indirect)

BETTERAVE INDIRECT	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
Précipitation m ³ /litre de bioéthanol	1,067	1,169	1,008	0,038	1,002	1,771	2,038	0,722	0,823	0,593	0,640	1,063	11,932
Infiltration m ³ /litre de bioéthanol	0,279	0,279	0,279	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,279	0,279	0,279	1,675
Ruissellement avant usage m ³ /litre de bioéthanol	0,788	0,890	0,728	0,038	1,002	1,771	2,038	0,722	0,823	0,313	0,361	0,783	10,257
Evapotranspiration maximale m ³ /litre de bioéthanol	0,080	0,086	0,197	0,651	0,987	0,991	1,668	1,267	0,854	0,314	0,057	0,051	7,203
Taux de satisfaction du besoin en irrigation	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	4,000
Irrigation effective m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,545	0,031	0,000	0,000	0,000	0,576
Evapotranspiration réelle m ³ /litre de bioéthanol	0,788	0,890	0,728	0,038	1,002	1,771	2,038	1,267	0,854	0,313	0,361	0,783	10,833
Eau prélevée pour l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,641	0,037	0,000	0,000	0,000	0,678
Eau consommée par l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,572	0,033	0,000	0,000	0,000	0,605
Eau consommée process (évaporation) m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,041	0,041	0,041	0,041	0,163
Eau prélevée pour le procédé m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,067	0,067	0,067	0,067	0,268
Total d'eau consommée en m3/litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,572	0,074	0,041	0,041	0,041	0,768
Total eau prélevée m3/litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,641	0,104	0,067	0,067	0,067	0,946
Pourcentage d'eau prélevée/ressources renouvelables	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	88,70%	12,62%	11,31%	10,47%	6,31%	7,93%
Pourcentage d'eau consommée/ressources renouvelables	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	79,17%	8,96%	6,89%	6,38%	3,84%	6,44%

Tableau 41 Le bilan de l'usage de l'eau pour produire un litre de bioéthanol à 99,8% à partir de betterave (procédé direct)

BETTERAVE DIRECT	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Annuel
Précipitation m ³ /litre de bioéthanol	0,122	0,133	0,115	0,004	0,114	0,202	0,232	0,082	0,094	0,068	0,073	0,121	1,359
Infiltration m ³ /litre de bioéthanol	0,032	0,032	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,032	0,032	0,191
Ruissellement avant usage m ³ /litre de bioéthanol	0,090	0,101	0,083	0,004	0,114	0,202	0,232	0,082	0,094	0,036	0,041	0,089	1,169
Evapotranspiration maximale m ³ /litre de bioéthanol	0,009	0,010	0,022	0,074	0,112	0,113	0,190	0,144	0,097	0,036	0,007	0,006	0,821
Taux de satisfaction du besoin en irrigation	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	4,000
Irrigation effective m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,062	0,004	0,000	0,000	0,000	0,066
Evapotranspiration réelle m ³ /litre de bioéthanol	0,090	0,101	0,083	0,004	0,114	0,202	0,232	0,144	0,097	0,036	0,041	0,089	1,234
Eau prélevée pour l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,073	0,004	0,000	0,000	0,000	0,077
Eau consommée par l'irrigation m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,065	0,004	0,000	0,000	0,000	0,069
Eau consommée process (évaporation) m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,005	0,005	0,005	0,022
Eau prélevée pour le procédé m ³ /litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,007	0,007	0,007	0,029
Total d'eau consommée en m3/litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,065	0,009	0,005	0,005	0,005	0,090
Total eau prélevée m3/litre de bioéthanol	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,073	0,012	0,007	0,007	0,007	0,107
Pourcentage d'eau prélevée/ressources renouvelables	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	88,70%	12,33%	10,90%	10,10%	6,08%	7,85%
Pourcentage d'eau consommée/ressources renouvelables	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	79,17%	9,74%	7,97%	7,38%	4,45%	6,65%

X. Bibliographie

1. Loiseau, E. (2010). *Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux liés aux usages de l'eau*. Synthèse technique : AgroParisTech-ENGREF centre de Montpellier. Montpellier.
2. Risch, E., Roux, P., Boutin, C., Héduit, A, 2012. *L'analyse de cycles de vie (ACV) des systèmes d'assainissement : un outil complémentaire d'aide à la décision*. Mise au point et développement d'outils et de méthodes. Sciences Eaux & Territoires n°09.
3. Goedkoop, M. et al. 2013. ReCiPe 2008: A life cycle assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08). Report I: Characterisation. Les Pays-Bas.
4. Belboom, S, 2012. Evaluation de l'impact environnemental de la production de bioéthanol à partir de la canne à sucre, betterave ou froment par analyse de cycle de vie. Comparaison des utilisations biocarburant et bioplastique. Thèse de doctorat : Sciences de l'Ingénieur. Liège : Université de Liège.
5. Agence d'Urbanisme de l'arrondissement de Béthune (AULAB). Mars 2011. L'Observatoire de l'Environnement. La ressource en eau : qualité et pressions. Numéro 2.
6. Milà i Canals, L., Chenoweth, J., Chapagain, A., Orr, S., Antón, A., Clift, R. (2009). LCA Methodology Assessing Freshwater Use Impacts in LCA Part I: Inventory Modelling and Characterisation Factors for the Main Impact Pathways.
7. Guinée, J. B., Heijungs, R. (1994). Life-Cycle Assessment. A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product Life-Cycle Assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 14, No. 5, pp. 917-925, 1995.
8. Luther, S., Giljum, S., 2009. Developing targets for global resource use. Targets for freshwater use. IntRESS. March 2015, Vienna.
9. Fingerman, K. R. et al. 2010. Accounting for the water impacts of ethanol production. *Environmental Research Letters*. Publié par IOP Publishing.
10. S.A.G.E de la Lys, 2010. Plan d'aménagement et de gestion durable de la ressource en eau [en ligne] (page consulté le 13 mars 2015).
<http://www.sage-lys.net/index.php/ct-menu-item-16>
11. Syndicat Mixte Rivière Drôme & ses affluents, 2012. Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous-bassin versant de la Drôme - Rapport final. [en ligne] (page consulté le 6 mai 2015).
<http://www.riviere-drome.fr/documents-divers.php>
12. DRAAF Nord-Pas-de-Calais, 2011. La surface en betterave : Recensement agricole 2010 représenté par Petite Région Agricole [en ligne] (page consulté le 2 juin 2015).

- http://draaf.nord-pas-de-calais.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/5-9-1_Les_surfaces_en_betteraves_en_pourcentage_par_PRA_cle0351e1.pdf
13. Site officiel de la banque HYDRO
<http://www.hydro.eaufrance.fr/>
14. Chambre d'agriculture Bourgogne, 2015. Fiche de conseil collectif, Maïs [en ligne] (page consulté le 27 mai 2015).
http://www.bourgogne.chambagri.fr/fileadmin/documents_crab/Grandes_cultures/Fiches_culture_regionales/2015_Mais_VF.pdf
15. Chambre d'agriculture Limousin, Haute-Vienne, Corrèze – Creuse, 2008. Conseils Cultures & Fourrages, Maïs : itinéraire technique, du semis à la récolte [en ligne] (page consulté le 19 mars 2015).
[http://limousin.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/07542/\\$File/Fiche%20Maïs%20Itinéraire%202008.pdf?OpenElement](http://limousin.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/07542/$File/Fiche%20Maïs%20Itinéraire%202008.pdf?OpenElement)
16. ITB, 2014. Culture de la betterave sucrière. Raisonner l'itinéraire betterave [en ligne] (page consulté le 2 avril 2015).
<http://www.itbfr.org/apps/accesbase/bindocLoad2.asp?d=26379&idobj=VmhHmtn6>
17. ITB, 2014. Plaquette régionale Nord/Pas-de-Calais. Raisonner l'itinéraire betterave [en ligne] (page consulté le 6 mai 2015).
<http://www.itbfr.org/apps/accesbase/bindocload2.asp?d=26610?iframe=true&idobj=XLI8o4Vv>
18. ITB, 2014. Betterave sucrière : Progrès techniques & Environnement [en ligne] (page consulté le 6 mai 2015).
<http://www.itbfr.org/apps/accesbase/bindocLoad2.asp?d=23930&t=0&uid=57305290&sid=57305290&idk=1&idobj=sEdj0J63>
19. Agreste, les Dossiers 2013. Enquête Pratiques Culturelles 2011 : les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures, indicateurs de fréquence de traitement [en ligne] (page consulté le 14 avril 2015).
http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier18_integral.pdf
20. Agreste, les Dossiers 2013. Enquête Pratiques Culturelles 2011 : les traitements phytosanitaires sur les grandes cultures, nombres de traitements [en ligne] (page consulté le 1 avril 2015).
http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier17_integral.pdf
21. Agreste Nord – Pas-de-Calais 2014. Pratiques culturelles Grandes Cultures 2011 : Betteraves : fertilisation et travail du sol, la betterave sucrière : première culture industrielle de la région Nord – Pas-de-Calais [en ligne] (page consulté le 23 mars 2015).
http://draaf.nord-pas-de-calais.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/pratiques2011betteraves_cle85ab67.pdf

22. Agreste Nord – Pas-de-Calais 2008. Mémento de la statistique agricole [en ligne] (page consulté le 26 mai 2015).
http://draaf.nord-pas-de-calais.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/mementoNPDC2008_cle0d556f.pdf
23. Agreste Rhône-Alpes 2008. L'agriculture Rhône-Alpes en 2007 : annuaire de statistique agricole [en ligne] (page consulté le 26 mai 2015).
http://draaf.rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Annuaire_Agriculture_2007_cle0d1843-1.pdf
24. Agreste Rhône-Alpes 2014. Enquête pratiques culturales 2011 : céréales et oléagineux. 2011 : des pratiques comparables à celles de 2006 [en ligne] (page consulté le 23 mars 2015).
http://draaf.rhone-alpes.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/No163_PKGC_2011_cle0a1da2.pdf
25. Koch, P., Salou, T, 2015. Agribalyse® : Rapport Méthodologique, Version 1.2. ADEME
26. Site officiel IREP
<http://www.irep.ecologie.gouv.fr/IREP/index.php>
27. Site officiel ICPE
<http://installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr/>
28. Site officiel d'Abengoa Bioenergy France.
http://www.abengoabioenergy.com/web/en/acerca_de/oficinas_e_instalaciones/bioetanol/europa/bioenergy_france/index.html
29. SOGREAH Ingénierie, Communauté Artois-Lys, 1998. Etude de synthèse des données sur les ressources en eaux du bassin de la Lys.
30. D.I.R.E.N. Nord – Pas-de-Calais, Service de l'Eau, des Milieux Aquatiques, et des Risques Naturels, 2007. Réseau pluviométrique annuaire 2007 [en ligne] (page consulté le 11 juin 2015).
<http://www.nord-pas-de-calais.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/annuaire-2007.pdf>
31. Plantureux, S., 2013. *Le maïs*. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie et d'Industrie Alimentaire.
32. Diataé, Ingénierie des territoires agricoles, 2012. Etude agronomique et impact économique et environnemental de l'irrigation sur l'amont du bassin versant de la Drôme.
33. Hendawi, M. (2006). Etude des pertes d'eau par évaporation et dérive sur un jet d'asperseur. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II. Discipline: Mécanique des fluides.
34. Ruelle, P., Mailhol, J. C., Itier, B. (2004). Evaluation des pertes par évaporation lors des irrigations par aspersion en condition de fort déficit hydrique. Ingénieries n° 38 Etude CEMAGREF.
35. Deumier, JM., Bouthier, A., Lacroix, B., Espagnol, G. Quelle conduite de l'irrigation du maïs en ressource en eau restrictive ? Arvalis, Institut du végétal.
36. Oost, JFr, C.I.P.F. La fertilisation en culture de maïs [en ligne] (page consulté le 16 mars 2015).
http://www.cipf.be/fr/files/Ferti_maïs.pdf

37. BIO Intelligence Service, 2010. Analyses de Cycle de Vie appliquées aux carburants de première génération consommés en France. ADEME.
38. Cherubini, F. (2010). GHG balances of bioenergy systems – Overview of key steps in the production chain and methodological concerns. *Renewable Energy* 35(7): 1565-1573.
39. Renouf, M. A., M. K. Wegener & L. K. Nielsen (2008). An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. *Biomass and Bioenergy* 32(12): 1144-1155.
40. De Ruyck, J., J. M. Jossart, G. Palmers, S. Lavric, S. Bram, A. Novak, M. S. Remacle, G. Doms, C. Hamelinck, et al. (2006). Liquid biofuels in Belgium in a global bio-energy context. *Energy - Part 1: Sustainable production and consumptions patterns. Scientific support plan for a sustainable development policy*, VUB, UCL, 3E, Ecofys.
41. Poitrat, E. (2007). Les performances énergétiques des filières de production d'éthanol et leur impact sur l'effet de serre. Bilan énergétique de la filière céréalière. Académie des technologies. Chartres: 13-23.
42. CGB (Confédération Générale des planteurs de Betterave) 2007. Betterave et Environnement, une culture performante et raisonnée [en ligne] (page consulté le 5 mai 2015).
http://www.cgb-france.fr/IMG/pdf/betterave_et_environnement.pdf
43. Le betteravier romand, Bulletin du Centre betteravier suisse, 2000. Désherbage des betteraves sucrières [en ligne] (page consulté le 8 juin 2015).
<http://www.zuckerruebe.ch/pdf/francais/desherbage.pdf>
44. Ballerini, D., Alazard-Toux, N., 2006. Les biocarburants : Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement. IFP Publications.
45. CRAAQ (Centre de Référence en Agriculture et en Agroalimentaire du Québec), 2008. La production d'éthanol à partir de grains de maïs et de céréales. Québec.
46. Faure, O. Bassin de Lacq : visite de l'entreprise chimique Abengoa. Le journal Le Sud-Ouest publié le 30/03/2012.
<http://www.sudouest.fr/2012/03/30/j-ai-visite-abengoa-673737-4344.php>
47. ABBAN Association Béarn Bigorre Aragon Navarre. [en ligne] (page consulté le 19 mars 2015).
<http://www.abban.fr/2012/le-petrole-jaune-filiere-mais-ethanol-usine-abengoa-lacq/>
48. AGPM Association Générale des Producteurs de Maïs. [en ligne] (page consulté le 19 mars 2015).
<http://www.agpm.com/>
49. Wu, M., Mintz, M., Wang, M., Arora, S. (2009). Consumptive water use in the production of ethanol and petroleum gasoline. Center for Transportation Research. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory.

50. Arzate, A, 2005. Extraction du sucre de betterave. ACER : Centre de recherche de développement et de transfert technologique. Québec.
51. Decloux, M. Procédés de transformation en sucrerie (partie 1). Technique de l'Ingénieur, traité Agroalimentaire.
52. SNFS. L'approvisionnement en betteraves. La tare terre : un enjeu économique important [en ligne] (page consulté le 15 avril 2015).
<http://www.snfs.fr/site/images/pdf/La%20tare%20terre%20enjeu%20important.pdf>
53. SNFS. Process Industriel et Environnement. Les étapes de la fabrication du sucre de betterave [en ligne] (page consulté le 15 avril 2015).
[http://www.snfs.fr/site/images/pdf/Les%20etapes%20de%20la%20fabrication%20du%20sucre.p
df](http://www.snfs.fr/site/images/pdf/Les%20etapes%20de%20la%20fabrication%20du%20sucre.pdf)
54. Rogè, B., Prof Mathlouthi. L'extraction du sucre. Dossier CEDUS
55. TEREOS. Le site Lillers [en ligne] (page consulté le 15 avril 2015).
<http://www.tereos-coproduits.com/sites/default/files/uploads/LILLERS.pdf>
56. TEREOS. Pulpes déshydratées [en ligne] (page consulté le 15 avril 2015).
<http://tereos-coproduits.com/sites/default/files/uploads/Pulpe-deshydratee-FR.pdf>
57. TEREOS. Vinasse [en ligne] (page consulté le 15 avril 2015).
<http://www.tereos-coproduits.com/sites/default/files/uploads/Vinasse-FR.pdf>
58. TEREOS. Ecumes de sucrerie [en ligne] (page consulté le 15 avril 2015).
<http://tereos-coproduits.com/sites/default/files/uploads/Ecumes-de-sucrerie-FR.pdf>
59. Krajnc, D., Mele, M., Glavič, P (2006). Improving the economic and environmental performances of the beet sugar industry in Slovenia: increasing fuel efficiency and using by-products for ethanol. Journal of Cleaner Production. Publié par Elsevier.
60. Kusko, B. H., Franklin, W. E, 2009. Analyse du cycle de vie. Réalisation de l'inventaire. Technique de l'Ingénieur, traité Génie Industriel. Armanet Michel.
61. MEDD & Agence de l'eau, 2003. Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ-Eau), grilles d'évaluation version 2 [en ligne] (page consulté le 17 mars 2015).
<http://sierm.eaurmc.fr/eaux-superficielles/fichiers-telechargeables/grilles-seq-eau-v2.pdf>
62. ADEME. Vinasse de mélasse de betterave [en ligne] (page consulté le 22 juin 2015). Comité National des Coproduits.
[http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/a8881a09-7321-47bf-8af1-
b73b628513b4](http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/a8881a09-7321-47bf-8af1-b73b628513b4)
63. DREAL. (2008). Tableau de bord des arrêtés préfectoraux pour l'étiage 2007 pris sur le bassin Rhône Méditerranée - Situation 10 janvier 2008. [en ligne] (page consulté le 10 août 2015).
<http://www.donnees.rhone-alpes.developpement->

durable.gouv.fr/bassin_rmc/bsh/Secheresse/Annee-2007/AP-
limusages/10janvier2008_%20tableaubord_APsechRMed.pdf