

Rapport final décembre 2004

Energie à partir de petit-lait : comparaison des filières biogaz et bioéthanol

Rédigé par
Hélène Fruteau de Laclos
Yves Membrez
EREP SA
Chemin du Coteau 28, 1123 Aclens

Mandant

Programme de recherche énergétique Biomasse
Office fédéral de l'énergie

Mandataire

EREP SA
Chemin du Coteau 28, CH-1123 Aclens

Office fédéral de l'énergie

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Adresse postale : 3003 Berne
Tel : 031 322 56 11 • Fax : 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch/bfe • www.admin.ch/bfe

Distribution

ENET
Egnacherstraase 69, CH-9320 Arbon
Tel : 071 440 02 55 • Fax : 071 440 02 56 • enet@temas.ch

Ont collaboré à cette étude :

Julien Dovat, EREP SA, CH-1123 Aclens
Thibaut Chaslerie, EREP SA, CH-1123 Aclens
AlcoSuisse, CH-3000 Berne 9
Laboratoire des Systèmes Energétiques , EPFL, CH-1015 Lausanne
Laboratoire de Biotechnologie Environnementale (LBE), EPFL, CH-1015 Lausanne
Provimi-Kliba SA, CH-1305 Cossonay-Gare
Fromagerie André, CH-1122 Romanel-sur-Morges

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie.
Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions.

RESUME

La Suisse produit chaque année 160'000 tonnes de fromage générant ainsi environ 1.5 millions de m³ de petit-lait. Traditionnellement valorisé en affouragement porcin, le petit-lait a une valeur nutritive, et donc énergétique, élevée. Mais aujourd'hui la filière doit faire face à deux contraintes majeures : d'une part la compétition économique avec d'autres aliments, d'autre part la réorganisation de l'élevage porcin et les limitations de l'épandage des lisiers. Parmi les filières alternatives, la valorisation énergétique s'inscrit bien dans le cadre de la politique énergétique et de la lutte contre l'effet de serre. Deux filières sont envisageables : la production de biogaz et la production de bio-éthanol.

La première partie du projet avait pour but de valider un concept de production et de valorisation de biogaz au niveau d'une fromagerie de taille moyenne.

Dans un premier temps une étude expérimentale a été réalisée sur un méthaniseur pilote adapté à ce substrat, de type « lit fixé à flux descendant ». Elle a permis de déterminer les paramètres de fonctionnement optimaux ainsi que les performances du procédé. Ainsi le rendement en méthane atteint représente plus de 95% du maximum théorique.

L'analyse des consommations énergétiques de la fromagerie a montré que la production de chaleur représentait la meilleure voie de valorisation du biogaz. En intégrant un stockage optimisé de l'énergie, le biogaz produit à partir du petit-lait permet de substituer les 2/3 du mazout total consommé chaque année par la fromagerie.

Concernant une possible valorisation du petit-lait digéré en alimentation animale, les résultats sont négatifs. Du fait de la très bonne biodégradabilité du petit-lait il ne reste que très peu d'éléments nutritifs après la digestion. De plus l'odeur du produit, due essentiellement à la présence d'acides résiduels et de produits soufrés, est réductrice.

L'étude économique, réalisée sur la base des résultats obtenus, a montré que le coût total de la production et de la valorisation du biogaz à partir de petit-lait se monte à 26 CHF environ par m³ de petit-lait. Cette solution pourrait donc rapidement s'avérer économiquement intéressante dans le cas, de plus en plus fréquent, où la fromagerie doit payer pour la prise en charge du petit-lait des montants qui atteignent actuellement déjà 15 à 20 CHF/m³. Ainsi le surcoût de la méthanisation s'élèverait à 6 -11 CHF/m³.

La deuxième partie a été réalisée en collaboration avec AlcoSuisse, partenaire du projet, et son mandataire le Laboratoire de Systèmes Energétiques de l'EPFL.

La production de bio-éthanol ne peut s'envisager que dans une installation centralisée : l'unité de production envisagée dans cette étude traite plus de 100 fois plus de petit-lait que la fromagerie de référence de la filière biogaz. La filière implique une étape de concentration puis de transport sur 120 km du petit-lait concentré vers l'unité de production de bioéthanol. Celui-ci peut être utilisé pour substituer de l'essence dans une limite de 5% (essEnce5). Le coût de production de bio-éthanol dans les conditions de la présente étude correspond à 27 CHF par m³ de petit-lait brut. Avec un prix de marché estimé en Suisse à 1.40 CHF/litre de bio-éthanol (détaxe sur les bio-carburants) le petit-lait pourrait être rémunéré à 1.15 CHF par m³.

Une analyse de cycle de vie (ACV) a été réalisée pour comparer les deux filières d'un point de vue environnemental. La méthode employée est EcoIndicator 99, mais seulement deux types d'impact sont considérés ici : la consommation des ressources en énergie fossile et l'impact sur l'effet de serre. Pour la pertinence de la comparaison on a retenu les deux cas suivants :

- substitution du mazout par du biogaz pour la production d'eau chaude sur la fromagerie

- substitution de l'essence par de l'essence5 (5% de bio-éthanol) comme carburant véhicule

Les résultats montrent, dans les conditions retenues pour l'étude, une différence non significative entre les deux filières pour les impacts considérés : la valorisation énergétique d'un m³ de petit-lait en bio-carburant ou en bio-combustible permet d'économiser plus de 20 litres _{pétrole eq.} d'énergie fossile et d'éviter la production de 60 kg CO_{2eq}. On pourrait imaginer que ces deux filières soient complémentaires, en fonction de la taille et/ou de la proximité des fromageries.

ZUSAMMENFASSUNG

In der Schweiz werden jährlich gegen 160'000 t Käse produziert, welche seinerseits gegen 1,5 mio. m³ Molke generieren. Traditionellerweise wurde die Molke bisher in der Schweinemast weiterverwendet, da dieses „Abfall“-Produkt über einen hohen Nähr- bzw. Energiewert verfügt. Heutzutage stehen dieser Verwendungsart zwei gewichtige Erschwernisse gegenüber: Auf der einen Seite stehen erweiterte Ueberlegungen betreffend der Wirtschaftlichkeit dieser Verwendung in Anbetracht der Verbilligung anderer Schweinefuttermittel, auf der anderen Seite die Reorganisation der Schweinezuchten im Zusammenhang mit der Beschränkung der Verwendung von Gülle und deren Ausbringung.

Unter den möglichen Alternativverwendungen steht die Energierückgewinnung aus dem Produkt in Anbetracht der heutigen Energiepolitik und der Bekämpfung des Treibhauseffektes im Vordergrund. Zwei entsprechende Energierückgewinnungsmodelle sind diesbezüglich vorstellbar: Die Produktion von Biogas und die Produktion von Bioethanol.

Die erste Phase unseres Projektes verfolgte das Ziel, ein Konzept für die Gewinnung von Biogas in einer Käserei von mittlerer Grösse zu erstellen.

Der erste Schritt beinhaltete eine Experimentierstudie, welche mittels einem auf dieses Substrat angepasstem „downflow Anaerobfilter“ Pilotreaktor ausgeführt worden ist. Die Studie hat uns erlaubt, die optimalen Prozessparameter und Leistungsparameter zu definieren. Dieses System erlaubte uns 95 % des theoretisch möglichen maximalen Methanertrages zu erreichen.

Die anschliessende Analyse der Energieverwendung hat ergeben, dass die Wärmeproduktion mittels Biogas die rentabelste Verwendung ist. Unter Berücksichtigung einer optimalen Lagerung der Wärme, konnte mittels dieser Energiegewinnung 2/3 des jährlichen Heizölverbrauchs der betroffenen Käserei ersetzt werden.

Die Resultate betreffend der weiteren Verwendung als Futtermittel der Molke nach der Biogasgewinnung waren negativ. Aufgrund des sehr guten und umfangreichen Abbaus der Grundmaterie im Zuge der Energiegewinnung, blieb nur wenig Material mit einem sehr tiefen Nährwert zurück. Im weiteren schliesst der sehr starke Geruch der Restprodukte, entstehend aufgrund der Säuren- und Schwefelrückstände, eine vernünftige Weiterverwertung aus.

Die Wirtschaftlichkeitsstudie zeigte auf, dass die Produktion und Wiederaufbereitung von Biogas auf der Basis von Molke auf rund CHF 26.-- pro m³ zu stehen kommt. Diese Lösung dürfte demzufolge kurzfristig interessant werden, da, wie immer häufiger der Fall, die Käsereien CHF 15.-- bis CHF 20.-- pro m³ für die Entsorgung bezahlen müssen. Aufgrund dieser Rechnung wäre die Differenz gegenüber den reinen Entsorgungskosten nur noch CHF 6.-- bis CHF 11.-- pro m³.

Die zweite Phase wurde in Zusammenarbeit mit unserem Projektpartner, AlcoSuisse, sowie dessen Mandaten dem „Laboratoire des Systèmes Energétiques“ EPFL (Lausanne) durchgeführt.

Die Produktion von Bioethanol kann nur in grossen Verarbeitungszentralen vorgesehen werden. In Einheiten, welche bis zu 100 x grössere Mengen verarbeiten als unsere für die Biogasgewinnung ausgewählte Anlage. Das Konzept muss demzufolge zentrale Sammelstellen sowie den Transport über rund 120 km zur nächsten Bioethanolproduktionsanlage vorsehen. Das gewonnene Bioethanol könnte 5 % des herkömmlichen Benzins ersetzen (essEnce5). Die Bioethanol-Produktionskosten, im Rahmen der in der Studie erwähnten Verarbeitungsmethode, belaufen sich auf CHF 27.-- pro m³ Molke (brutto). Mit einem geschätzten Verkaufspreis von CHF 1.40 pro Liter

Bioethanol (Zollfreigabe der Bio-Treibstoffe), würden sich die Vergütung pro m³ Molke auf CHF 1.15 belaufen.

Zusätzlich wurde eine Lebenszyklusanalyse erstellt, um die zwei analysierten Varianten aus einem ökologischen Blickwinkel vergleichen zu können. Es wurde die Methode EcoIndicator 99 verwendet, unter ausschliesslicher Berücksichtigung der zwei folgenden Einflussfaktoren: Verbrauch von fossilen Energiequellen und der Auswirkung auf den Treibhauseffekt.

Für die Stichhaltigkeit der Vergleiche wurden folgende zwei Szenarien berücksichtigt:

- Ersetzung des Heizöls durch Biogas zwecks Wassererwärmung in der Käserei
- Ersetzung von herkömmlichem Benzin durch EssEnce5 (5 % Bioethanol-gehalt) als Fahrzeugtreibstoff

Die erhaltenen Werte der zwei untersuchten und verglichenen Methoden zeigen, innerhalb der angewendeten Vergleichsmodelle, nur sehr kleine, vernachlässigbare Unterschiede. Die Energierückgewinnung von einem m³ Molke in Form von Biogas oder Bioethanol würde die Einsparung von über 20 Liter _{Eq.} _{Edröl} aus fossilen Quellen und der Produktion von 60 kg CO₂ vermeiden.

Die zwei beschriebenen Prozesse können demzufolge als komplementär betrachtet werden und sollten je nach Grösse und/oder Nähe des Produktionsstandortes ausgewählt werden.

SUMMARY

Switzerland produces 160'000 tons of cheese per year, that results in the production of 1.5 millions m³ of cheese whey. This waste product has a high energetic value and has been used up to now for pigs feeding, an utilisation that encounters more and more constraints. Alternative ways to recover the valuable resources of cheese whey are the production of renewable energy by producing biogas or bio-ethanol.

The first part of the project presented here aimed to validate a concept for production and use of biogas on-site at a middle-size cheese factory. In a first step, an experimental study was carried out with a down-flow fixed-film bioreactor. This allowed determining the optimal working parameters as well as the performance of the process. The methane yield reached more than 95% of the theoretical potential. Analysis of energy needs of the cheese factory showed that heat in the form of hot water was the most suitable way to use the biogas formed. With optimal energy storage, the biogas production allows replacing two third of the total annual fuel-oil consumption. The overall costs for biogas production and use in a boiler amount to 26 CHF per m³ whey.

The second part of the project aimed to compare the two processes bio-ethanol and biogas production. It was carried out in collaboration with AlcoSuisse and his mandatory Laboratory of Energy Systems at EPFL. Production of bio-ethanol was supposed to take place in a centralised plant where about 100-times more whey is processed than in the biogas concept. It was further supposed that in a first step whey will be concentrated and transported to the bio-ethanol production plant and that bio-ethanol can be used to replace conventional gasoline up to 5%. A life cycle assessment (LCA) has been carried out in order to compare the two processes from an environmental point of view. Only two impacts have been considered: fossil fuel consumption and greenhouse effect. The following two cases were compared: i) replacement of fuel-oil by biogas for heat production and ii) replacement of conventional gasoline by "essEnce5" (5% bio-ethanol). The results showed that there was no significant difference between the two processes. The treatment of one cubic meter of cheese whey allows in either way saving more than 20 litres_{oil eq.} of fossil fuel and 60 kg of CO_{2 eq.} emission.

TABLE DES MATIERES

A.	SITUATION INITIALE.....	10
A.1	Production du petit-lait.....	10
A.2	Composition du petit-lait.....	11
A.3	Valorisation du petit-lait.....	13
A.3.1	<i>Affouragement porcin.....</i>	<i>13</i>
A.3.2	<i>Affouragement bovin.....</i>	<i>14</i>
A.3.3	<i>Séparation et valorisation des protéines.....</i>	<i>14</i>
A.3.4	<i>Concentration /déshydratation du petit-lait.....</i>	<i>15</i>
A.3.5	<i>Valorisation énergétique.....</i>	<i>16</i>
A.3.6	<i>Autres valorisations.....</i>	<i>17</i>
B.	OBJECTIFS DE L'ETUDE ET DEMARCHE DE TRAVAIL	18
B.1	Première partie de l'étude	18
B.2.	Deuxième partie de l'étude	18
C.	PREMIERE PARTIE : PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DE PETIT-LAIT	20
C.1	Bibliographie.....	20
C.1.1	<i>Les technologies spécifiques</i>	<i>20</i>
C.1.2	<i>Les études à l'échelle du laboratoire</i>	<i>21</i>
C.1.3	<i>L'application industrielle.....</i>	<i>23</i>
C.2	Etude expérimentale	24
C.2.1	<i>Le bio-réacteur.....</i>	<i>24</i>
C.2.2	<i>Les mesures</i>	<i>24</i>
C.2.3	<i>L'alimentation du bio-réacteur</i>	<i>26</i>
C.2.4	<i>Paramètres de fonctionnement.....</i>	<i>27</i>
C.3	Résultats expérimentaux	28
C.3.1	<i>Calendrier de l'essai</i>	<i>28</i>
C.3.2	<i>Composition du petit-lait frais</i>	<i>28</i>
C.3.3	<i>Première partie : démarrage et stabilisation de la méthanisation</i>	<i>28</i>
C.3.4	<i>Deuxième partie : optimisation du fonctionnement</i>	<i>30</i>
C.3.5	<i>Valorisation de l'effluent digéré</i>	<i>32</i>
C.3.6	<i>Aspects pratiques du fonctionnement.....</i>	<i>33</i>
C.3.7	<i>Conclusion de l'expérimentation</i>	<i>34</i>
C.4	Valorisation énergétique du biogaz.....	35
C.4.1	<i>Production de fromage et de petit-lait</i>	<i>35</i>
C.4.2	<i>Analyse des consommations énergétiques de la fromagerie</i>	<i>35</i>
C.4.3	<i>Valorisation du biogaz</i>	<i>38</i>
C.4.4	<i>Modélisation des flux de matières et d'énergie de l'installation proposée.....</i>	<i>43</i>
C.5	Faisabilité économique de l'installation de biogaz.....	44
C.5.1	<i>Procédure.....</i>	<i>44</i>
C.5.2	<i>Description technique de l'installation</i>	<i>44</i>
C.5.3	<i>Evaluation des coûts.....</i>	<i>45</i>
C.6	Conclusion de la première partie	47

D.	DEUXIEME PARTIE : COMPARAISON DES FILIERES BIOGAZ ET BIO-ETHANOL	48
D.1	Introduction.....	48
D.2	Description technico-économique de la filière bio-éthanol.....	48
D.2.1	<i>Concentration et acheminement du petit-lait concentré</i>	<i>49</i>
D.2.2	<i>Production d'éthanol à partir de petit-lait concentré.....</i>	<i>51</i>
D.2.4	<i>Analyse économique de la filière bio-éthanol</i>	<i>53</i>
D.3	Analyse de cycles de vie : définitions et méthode	55
D.3.1	<i>Principe et définitions</i>	<i>55</i>
D.3.2	<i>Système, unité fonctionnelle et méthode d'analyse.....</i>	<i>56</i>
D.3.3	<i>Caractérisation des critères d'impacts environnementaux considérés.....</i>	<i>59</i>
D.3.4	<i>Hypothèses concernant l'analyse de cycle de vie.....</i>	<i>61</i>
D.3.5	<i>Limites de l'analyse de cycle de vie.....</i>	<i>61</i>
D.3.6	<i>Calcul d'allocation.....</i>	<i>61</i>
D.4	Résultats des ACV	62
D.4.1	<i>Présentation des résultats de la filière biogaz</i>	<i>62</i>
D.4.2	<i>Présentation des résultats de la filière bio-éthanol</i>	<i>65</i>
D.5	Comparaison des filières biogaz et bioéthanol	67
D.5.1	<i>Facteur d'échelle.....</i>	<i>67</i>
D.5.2	<i>Aspects économiques.....</i>	<i>67</i>
D.5.3	<i>Impacts environnementaux.....</i>	<i>68</i>
D.6	Conclusion de la deuxième partie et perspectives.....	70
E.	LISTE DES ABREVIATIONS	71
F.	ANNEXES.....	72
	Annexe 1 : Résultats du fonctionnement du bioréacteur	73
	Annexe 2 : Solution éléments trace	82
	Annexe 3 : Illustrations photographiques.....	83
	Annexe 4 : Cogénération.....	84
	Annexe 6 : Description de la production de bio-éthanol	85
	Annexe 7 : Economie de la production de bioéthanol.....	90
	Annexe 8 : Données des ACV	96
	Annexe 9 : Cycle de vie des carburants	98
G.	BIBLIOGRAPHIE.....	102

A. SITUATION INITIALE

A.1 PRODUCTION DU PETIT-LAIT

La production laitière en Suisse s'élève à près de 3.2 millions de tonnes par an (données 2003 ; source : <http://www.tsm-gmbh.ch>). L'utilisation du lait est illustrée sur la figure 1.

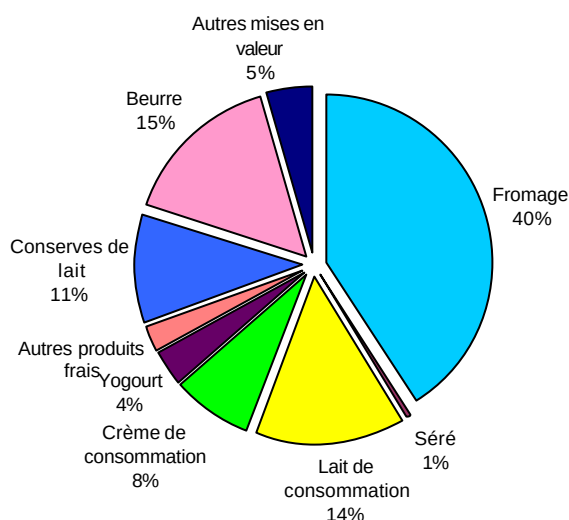


Figure 1 : Utilisation du lait en Suisse en 2003

On peut constater l'importance de l'industrie fromagère puisque 40% de la production laitière y est consacrée. De fait la Suisse produit chaque année environ 160'000 tonnes de fromage.

La fabrication du fromage peut être décomposée en quatre grandes étapes (figure 2):

- le caillage ou coagulation : sous l'action de ferments (bactéries) ou de pressure (enzymes) les protéines du lait coagulent pour former le caillé. La majeure partie des protéines et des graisses du lait sont retenues dans le caillé
- l'égouttage : on retire l'excédent liquide du caillé : on obtient le lactosérum ou petit-lait, qui contient encore des matières grasses. Selon le type de fromage, l'égouttage peut être accompagné par des étapes de découpage du caillé, brassage, pressage, chauffage (fromages à pâte cuite). Le caillé est finalement moulé
- la salage : la salage favorise la bonne conservation du fromage et accélère le séchage et la formation de la croûte.
- l'affinage ou maturation : la pâte se transforme sous l'action de la flore bactérienne. L'affinage s'effectue à une température et une humidité optimale selon le type d fromage

Il faut environ 11 kg de lait pour faire 1 kg de fromage sec. Il reste donc 10 kg de petit-lait.

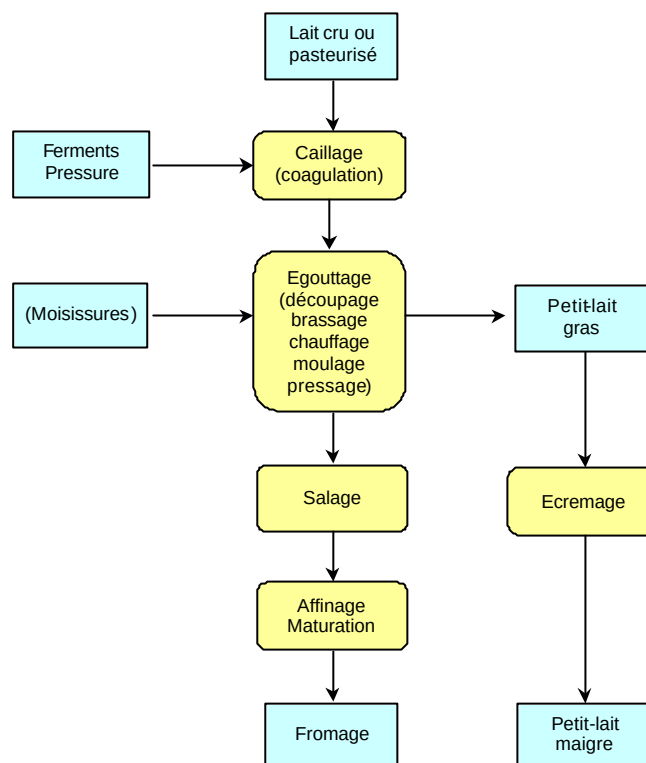


Figure 2 : La fabrication du fromage

On distingue deux types de petit-lait :

- le petit-lait doux provient de la fabrication des fromages à pâte pressée dont le caillé a été obtenu principalement à partir de pression. Il contient peu (< 1.8 g/l) d'acide lactique et présente un pH de 5 à 6
- le petit-lait acide provient de la fabrication des fromages à pâte molle et pâte fraîche dont le caillé a été obtenu principalement à partir de ferments lactiques. Il contient de l'acide lactique (>1.8 g/l) qui provient de la transformation du lactose par les bactéries lactiques. Son pH est de l'ordre de 4.

Enfin le petit-lait peut être écrémé afin de récupérer la crème qu'il contient. On parle alors de petit-lait maigre.

A.2 COMPOSITION DU PETIT-LAIT

La composition moyenne du petit-lait doux et acide est reportée dans le tableau 1 (source : <http://www.vet-lyon.fr/ens/nut>).

La principale caractéristique du petit-lait est sa teneur en eau qui avoisine 95% : les éléments nutritifs qu'il contient sont donc dilués.

Les lactosérums sont riches en lactose, potassium et chlorure. Le lactosérum doux est pauvre en calcium. La présence de chlorure et d'acides confère au petit-lait un caractère corrosif.

		petit-lait doux	petit-lait acide
matière sèche (MS)	g/l	55 à 75	50 à 65
lactose	g/l	40 à 50	40 à 50
matière grasse (MG)	g/l	0 à 5	0 à 2
protéines totales (MAT)	g/l	9 à 11	7 à 10
matières minérales (MM)	g/l	4 à 6	6 à 8
Calcium (Ca)	g/l	0.4 à 0.6	1.2 à 1.4
Phosphore (P)	g/l	0.4 à 0.7	0.5 à 0.8
Potassium (K)	g/l	1.4 à 1.6	2.0 à 2.2
Chlorure (Cl)	g/l	2.0 à 2.2	2.0 à 2.2
Acide lactique	g/l	0 à 0.3	7 à 8

Tableau 1 : Composition moyenne du petit-lait

Le petit-lait n'est pas très riche en protéines : l'élément le plus nutritif est la lysine digestible. Les facteurs limitants sont représentés par les acides aminés soufrés.

La concentration élevée en lactose est également un facteur limitant car il favorise la fermentation intestinale lactique et butyrique.

La valeur alimentaire du petit-lait pour différents types d'animaux de rente est résumée dans le tableau 2 (source : <http://www.vet-lyon.fr/ens/nut>). A noter que d'une façon générale le lactosérum acide est peu appétent.

	Ruminants UFL (1)	Ruminants UFV (2)	Porcs E D (3) kcal/kg	Volailles EM (4) kcal/kg
lactosérum doux	1.13	1.15	3672	2880
lactosérum acide	1.08	1.11	3500	
orge (*)	1.09	1.07	3540	3190

(*) pour comparaison, en % de la matière sèche

(1) Unité Fourragère Lait

(2) Unité Fourragère Viande

(3) Energie Digestible Porcs

(4) Energie Métabolisable Volailles

Tableau 2 : Valeur alimentaire du petit-lait pour différents animaux de rente

Une caractéristique importante du petit-lait doux est sa propension à donner lieu à des proliférations bactériennes. Selon l'utilisation ultérieure (alimentation animale par exemple) il faut donc le stabiliser. Plusieurs méthodes sont possibles :

- la réfrigération
- la fermentation lactique contrôlée pour abaisser le pH à environ 4
- l'addition de formol, d'eau oxygénée, d'acide formique

A.3 VALORISATION DU PETIT-LAIT

En 2002, sur les 1,26 millions de tonnes de petit-lait produit par les fromageries suisses, la valorisation recensée était la suivante (1)

- affouragement porcin : 900 000 t
- déshydratation en poudre : 140 000 t
- industries des boissons : 42 000 t
- autres utilisations : 178'000 t

A.3.1 Affouragement porcin

C'est la valorisation historique traditionnelle du petit-lait. Sa valeur nutritionnelle, notamment protéique, l'assimile à une soupe d'orge diluée (voir tableau 4). Son utilisation est limitée à 40% au maximum de la matière sèche de la ration alimentaire.

Contexte économique

Ce débouché perd peu à peu de l'importance en raison principalement de la diminution du prix des céréales. La figure 5 met en évidence l'évolution du prix à la production de la viande de porc en Suisse entre les années 1990/92 et 2000/02 et celui de l'orge (élément principal de la nutrition des porcs) entre les mêmes périodes et cela pour la Suisse et l'Union Européenne (Source : <http://www.blw.admin.ch>). On constate une forte diminution du prix du porc à la production, accompagnée d'une forte diminution du prix des céréales : dans ces conditions le petit-lait a de plus en plus de mal à rester compétitif.

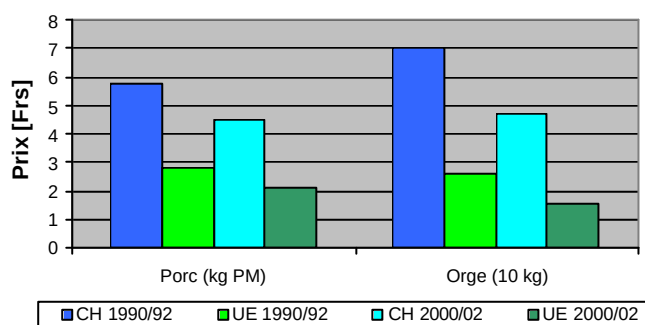


Figure 3 : Evolution du prix du porc à la production et de l'orge dans l'UE et en Suisse

Dans un rapport sur la mise valeur du petit-lait en Suisse (2), il a été estimé qu'avec un prix de l'orge de 50 Frs/quintal et en comptant les frais supplémentaires liés à son affouragement, un petit lait de bonne qualité, en raison ses différentes valeurs nutritionnelles, peut-être vendu au prix de 1-2 cts/kg pour autant que le transport ne soit pas trop élevé. Ainsi, lorsqu'on observe le prix de l'orge en Europe (15 Frs/quintal, voir figure 3), l'avenir de la valorisation du petit lait par les porcs semble difficile.

En outre, le petit lait est une denrée exigeante en ce qui concerne la technique et son coût de conservation est élevé. Stockage et distribution nécessitent des infrastructures spécifiques, puisque c'est un aliment liquide et périssable.

Contexte structurel

Le deuxième facteur négatif est l'évolution structurelle de l'industrie de la viande. En plus de la baisse du prix à la production de la viande de porc, beaucoup de petites porcheries (propriétés généralement des fromageries) deviennent vétustes et ne remplissent plus les nouvelles exigences sur la détention des animaux en Suisse.

Mais la construction de nouvelles porcheries est elle-même limitée, notamment par :

- les contraintes pour l'épandage du lisier : les bilans de fumure des domaines agricoles alentours sont de plus en plus chargés
- l'opposition de la part des milieux non paysan et touristique.

Ces conditions deviennent de plus en plus difficiles à satisfaire et cela surtout dans les zones à forte production laitière.

De plus le marché de la viande porcine suisse a tendance à perdre de son importance. En effet, selon l'office fédéral de la statistique, le nombre de porcs, en milliers, est passé de 1'776 à 1'548 entre les années 1990 et 2001. Cette évolution signifie sur le marché de la viande une diminution de 13 % entre les années 1990/92 et 2000/02 (<http://www.blw.admin.ch>). Dans le but de résister à cette évolution, les porcheries tendent à se centraliser en grandes unités.

Ainsi, un problème essentiel vient de la disponibilité d'élevages porcins à proximité des producteurs de petit-lait. Ce dernier critère implique des frais de transport du petit lait devenant de plus en plus importants.

La teneur en eau du petit-lait brut limite son transport d'un point de vue économique. La déshydratation du petit-lait, totale ou partielle, est possible mais son coût en fait une technologie réservée aux gros producteurs.

A.3.2 Affouragement bovin

Vaches laitières

Le petit-lait peut être affouragé aux vaches laitières. C'est un aliment très appétent, mais compte tenu de sa concentration élevée en sucres, il présente un risque d'acidose ruminale. Sa consommation doit donc être limitée. De plus, à la différence des céréales, il n'a pas d'effet structurant et ne stimule pas l'activité de la panse bovine.

Contrairement aux porcs où le petit-lait est incorporé à la ration de « soupe », les bovins le consomment à l'état liquide. Lorsqu'il est acidifié, ce qui se produit dans les 24 heures après sa production, il perd de son appétence.

Le petit-lait remplace le fourrage de base. L'intérêt économique pour le producteur de bovins est faible.

Engraissement des veaux

Le petit-lait est un aliment de choix pour les veaux et il remplace avantageusement les autres produits dérivés du lait. Toutefois les possibilités d'utilisation restent limitées.

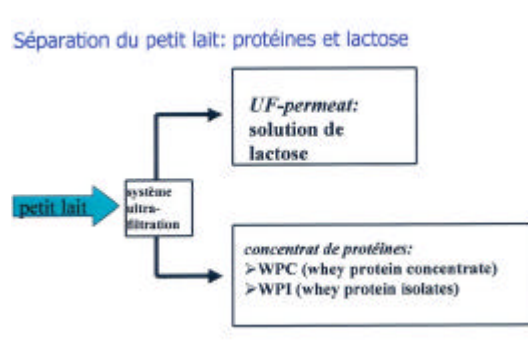
A.3.3 Séparation et valorisation des protéines

Les protéines du petit-lait représentent la fraction avec le potentiel de valorisation le plus élevé. La séparation est généralement réalisée par ultra-filtration (UF). Cette méthode met en jeu des membranes avec des pores de dimension comprise entre 0.01 et 0.1 μm et une

pression de filtration de 0.1 à 10 bars. On obtient un concentrat qui contient principalement les protéines et un perméat, qui contient principalement le lactose. Le schéma de principe est illustré sur la figure 4.

Les protéines sont valorisées en alimentation animale ou humaine. Les protéines du petit-lait constituent sa plus grande valeur nutritionnelle, grâce à la présence de lysine digestible. De plus elles possèdent des caractéristiques intéressantes dans l'alimentation humaine, notamment leur aptitude à former une mousse stable. Le perméat doit être valorisé ou traité.

Figure 4 : Schéma de principe de l'ultra-filtration
(source : AQUAREN)



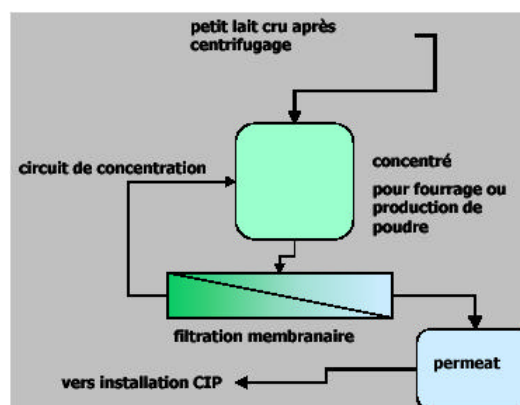
A.3.4 Concentration /déshydratation du petit-lait

Le petit-lait contient près de 95% d'eau. Pour abaisser les coûts de transport et pour faciliter l'affouragement et le stockage ou pour des utilisations spécifiques, le petit-lait peut être concentré et éventuellement déshydraté.

La concentration est généralement réalisée par un procédé membranaire : l'osmose inverse. La taille des pores est alors comprise entre 0.1 et 1 nm et la pression de fonctionnement requise est d'environ 20 à 30 bars. Une installation annexe (CIP) permet de nettoyer les membranes après chaque cycle de filtration : voir le schéma de principe sur la figure 5. Le petit-lait est concentré de deux à quatre fois, selon l'utilisation. Il se conserve mieux que le petit-lait brut et permet d'éviter des frais de transport. L'eau résiduelle est exempte de lactose et de protéines et peut être utilisée par exemple pour le nettoyage des installations.

La déshydratation nécessite au préalable, la cristallisation du lactose. On utilise un procédé de refroidissement rapide après initialisation du processus d'ensemencement. Le séchage final fait intervenir les techniques de « spray drying ».

Figure 5 : Schéma de principe de la concentration par osmose inverse (Source : AQUAREN)



A.3.5 Valorisation énergétique

Production de bio-éthanol

La filière bioéthanol-carburant peut apporter une contribution significative à la réduction des émissions de CO₂ dues aux transports (3), réduction à laquelle la Suisse s'est engagée dans le cadre du protocole de Kyoto. Déjà développée à large échelle dans plusieurs pays (Brésil, USA, France, Suède, Espagne), cette filière présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre rapidement et avec des investissements modestes pour les véhicules : à de faibles concentrations jusqu'à 5% (vol.) dans l'essence, seules des adaptations mineures du système de distribution et des précautions élémentaires sont nécessaires. A cette concentration et conformément à la norme européenne EN228 définissant l'essence sans plomb, le carburant est utilisable par tous les véhicules essence actuels. Ces avantages valent également, dans une moindre mesure, pour de faibles concentrations de bioéthanol dans le diesel.

En Suisse, le projet « Etha + » de la société AlcoSuisse, filiale de la Régie Fédérale des Alcools, a pour objectif de remplacer d'ici 2010 la totalité de l'essence consommée en Suisse par un mélange composé de 95% d'essence et 5% de bio-éthanol, baptisé « esseEnce5 ». Afin d'atteindre cet objectif AlcoSuisse développe le concept d'une usine de production « multi-matières » qui utilisera plusieurs types de matières premières : céréales, pommes de terre, mélasse de betteraves et petit-lait (source : <http://www.etha-plus.ch>).

Production de biogaz

La digestion anaérobie ou méthanisation consiste à transformer les matières organiques (sucres, protéines et graisses) en l'absence d'oxygène pour produire du biogaz, c'est à dire un mélange de méthane et de gaz carbonique. La transformation est réalisée par un ensemble de bactéries anaérobies. Outre l'aspect énergétique, la méthanisation présente des avantages pour l'épuration des effluents très chargés comme le petit-lait, avant leur rejet en station d'épuration.

Le biogaz se prête, éventuellement après épuration, à toutes les applications du gaz naturel :

- utilisation en chaudière
- valorisation électrique et thermique par co-génération
- injection dans le réseau de gaz naturel, après une épuration en fonction du type de réseau
- utilisation, après épuration, comme carburant dans tout véhicule fonctionnent au gaz naturel

Malgré les avantages certains de cette filière, elle a été peu explorée jusqu'à maintenant pour la valorisation du petit-lait. A contrario de nombreuses autres industries en Europe utilisent la méthanisation pour le traitement et la valorisation de leurs effluents concentrés, comme illustré dans le tableau 3.

Types d'industries	Nombre d'installations
Production alimentaire	371
Brasseries, industries des boissons	304
Distilleries/fermentations	206
Papeteries	130
Industries chimiques	61
Lixiviat de décharge	20
Autres	70

Tableau 3 : Installations de méthanisation d'effluents industriels en Europe (2002)

A.3.6 Autres valorisations

La petit-lait peut être valorisé directement en alimentation humaine (fabrication de boissons) ou en cosmétique. Ces débouchés restent restreints.

Enfin le petit-lait peut être épandu en agriculture ou composté en mélange avec un support structurant. Il s'agit plutôt alors de filières d'élimination que de valorisation, car l'intérêt agronomique du petit-lait (éléments nutritifs) est faible, et de plus on a observé à l'épandage des phénomènes de colmatage des sols.

B. OBJECTIFS DE L'ETUDE ET DEMARCHE DE TRAVAIL

Le débouché traditionnel de valorisation de petit-lait, l'affouragement porcin, est de plus en plus restreint pour des raisons essentiellement économiques. Les autres modes de valorisation alimentaire n'offrent que des débouchés limités. Compte tenu de sa charge polluante extrêmement élevée le rejet direct en station d'épuration est tout à fait exclu, et l'épandage déconseillé.

Les valorisations énergétiques du petit-lait s'inscrivent bien dans le cadre du développement durable et de la lutte contre l'effet de serre. Dans cette perspective, l'Office Fédéral de l'Energie a soutenu ce projet visant à valider la filière biogaz à partir de petit-lait pur et à la comparer avec le filière bio-éthanol.

B.1 PREMIERE PARTIE DE L'ETUDE

La première partie du travail concerne la production du biogaz. Le potentiel énergétique du petit-lait, calculé d'après la composition théorique, est très élevé : il représente pour la Suisse quelques 340 GWh par an. Par ailleurs les fromageries ont des consommations énergétiques importantes. Il est donc apparu intéressant de **valoriser l'énergie du petit-lait sur place** pour couvrir une partie des besoins énergétiques de la fromagerie.

Une première revue de la littérature a montré :

- qu'il n'y a pas, à ce jour, de publication sur une installation «en vraie grandeur» de méthanisation de petit-lait non dilué
- qu'il y a de nombreuses études en laboratoire ayant mis en évidence des problèmes techniques et biologiques avec cet effluent

Pour ces raisons le présent projet comporte une phase de validation expérimentale de la technologie de méthanisation sur du petit-lait non dilué.

Cette première partie du travail a pour but :

- de déterminer les conditions optimales de fonctionnement ainsi que les performances de la production de biogaz à partir de petit-lait, au travers d'une expérimentation de 6 mois à l'échelle pilote sur une fromagerie vaudoise
- d'évaluer la possibilité de valoriser le petit-lait digéré pour l'affouragement
- d'analyser les besoins énergétiques de la fromagerie et de choisir la valorisation énergétique la mieux adaptée
- de réaliser une pré-faisabilité technico-économique pour l'installation d'une unité de méthanisation du petit-lait avec valorisation du biogaz sur le site

B.2. DEUXIEME PARTIE DE L'ETUDE

La deuxième partie concerne la comparaison avec la filière bio-éthanol.

Dans un premier temps on présentera la production de bio-éthanol à partir de petit-lait. La description technico-économique de la filière a été réalisée par notre partenaire dans ce projet AlcoSuisse, et ses mandataires le bureau Planair et le Laboratoire des Systèmes Energétiques (LASSEN) de l'EPFL.

Dans un deuxième temps on examinera les impacts énergétiques et environnementaux associés à la production du biogaz et du bio-éthanol. Pour cela on utilisera un outil spécifique : l'analyse de cycle de vie (ACV) ou écobilan. Afin de garantir un maximum de

cohérence, les analyses de cycle de vie sont toutes réalisées par le LASEN (mandaté par AlcoSuisse) :

- à partir de leurs données propres pour la filière bio-éthanol
- à partir des données EREP issues de la première étape du projet pour la filière biogaz.

Il faut toutefois insister sur le fait que biogaz et bio-éthanol, bien que représentant tous deux une énergie renouvelable, ont dans ce projet des utilisations bien différentes :

- le premier est utilisé comme **combustible** en substitution de mazout ou de gaz naturel, en chaudière ou en couplage chaleur-force
- le deuxième est utilisé comme **carburant** en substitution d'essence ou de diesel, énergie déjà très transformée

C. PREMIERE PARTIE : PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DE PETIT-LAIT

C.1 BIBLIOGRAPHIE

C.1.1 Les technologies spécifiques

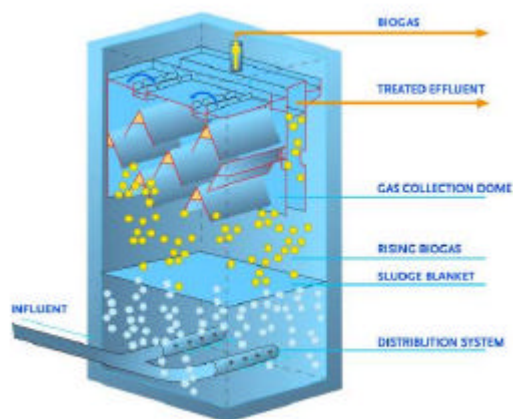
Pour traiter un effluent très concentré et à charge essentiellement soluble les technologies les mieux adaptées sont celles qui assurent le maintien de la biomasse bactérienne dans le bioréacteur. On distingue trois grands types de procédés qui sont décrits ci-après.

Les procédés à lit de boues à flux ascendant, ou UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Le procédé UASB, utilise la propriété des bactéries anaérobies à s'agréger dans certaines conditions en particules denses appelées granules. Les granules sédimentent dans la partie basse du bio-réacteur pour constituer un lit de boues granuleuses. La formation et la morphologie des granules dépend de la nature du substrat et des conditions de fonctionnement. L'influent est introduit à la base du réacteur et traverse le lit de boues. La vitesse ascensionnelle est faible, inférieure à 1 m/h, pour assurer une bonne homogénéité du lit de boues. Dans la partie supérieure du réacteur un dispositif permet le piégeage du biogaz et la rétention des granules qui pourraient être entraînées. Cette technologie de méthanisation des effluents est la plus répandue dans le monde.

Un procédé UASB est illustré sur la figure 6.

Figure 6 : Procédé UASB
(Source : Pâques)

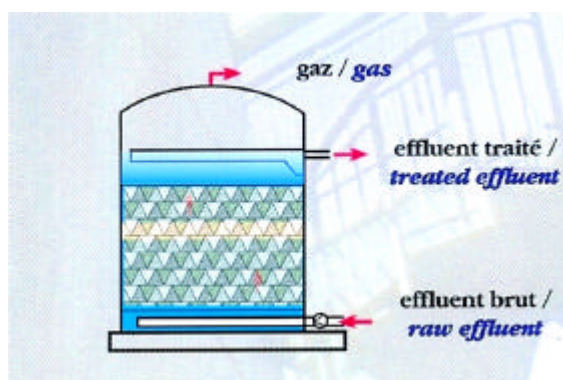


Les procédés à lits fixés ou filtres anaérobies

Dans ce type de procédé les bactéries anaérobies sont fixées, sous la forme d'un biofilm, sur un support statique. Ce support peut être constitué par un matériau minéral (pierre, ...) ou plastique. Le support peut être disposé « en vrac » ou bien orienté. Ces garnissages sont caractérisés par leurs coefficients de vide et leurs surfaces spécifiques. Le flux de liquide peut être ascendant (upflow) ou descendant (downflow).

Un procédé à lit fixé est illustré sur la figure 7.

Figure 7 : Procédé à lit fixé
(source :Degrémont)

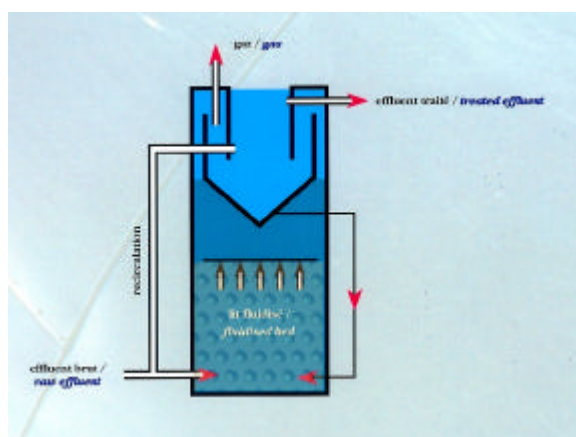


Les procédés à lits fluidisés ou expansés

Ce système met en œuvre la fixation de la biomasse bactérienne sur un support constitué de particules de petite taille, mobiles dans le bioréacteur. Les particules de support sont maintenues en suspension dans un courant ascendant de liquide. L'expansion de cette boue est fonction de la vitesse ascensionnelle de liquide (influent et effluent recirculé) : de 5 à 8 m/h pour les lits expansés et de 20 à 30 m/h pour les lits fluidisés.

La figure 8 illustre un procédé à lit fluidisé.

Figure 8 : Procédé à lit fluidisé
(Source : Degrémont)



C.1.2 Les études à l'échelle du laboratoire

A l'échelle du laboratoire plusieurs études ont été réalisées sur la méthanisation du petit-lait, ou du perméat de petit-lait, sans dilution. En effet ceux-ci constituent à priori un substrat idéal pour cette technologie : riche en composés solubles et biodégradables et exempt de produits toxiques.

Canovas-Diaz et col. (4) ont étudié la méthanisation du petit-lait sur un réacteur à lit fixé downflow avec un support plastique. Pour une charge faible, moins de 5 g DCO/l.j. une accumulation déjà importante d'acides volatils (2 g/l de propionate et 2 g/l de butyrate) était observée. L'addition de nickel (30 mg/l de $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) permettait une consommation immédiate du butyrate mais pas de l'acétate ni du propionate. Ils ont également observé que le fonctionnement avec une percolation sur les 2/3 du support donne de meilleurs résultats que lorsque le support est complètement immergé. L'hypothèse avancée est un meilleur transfert de métabolites notamment l'hydrogène. Mais on peut penser qu'il s'agit simplement d'une adaptation progressive de la flore, les deux modes de fonctionnement ayant été réalisés consécutivement sur le même réacteur.

Koepp-Bank et col. (5) ont montré que des systèmes à lits fixés, utilisant des pierres de lave comme support, peuvent fonctionner à une charge de 21 g DCO/l.j, avec une dégradation de 80% de la DCO.

Zellner et col. (6) ont obtenu sur un réacteur à lit fixé avec un support argileux, une charge de 24 g DCO/l.j en conditions stabilisées, alors que la charge maximale sur un réacteur simple infiniment mélangé était de 8 g DCO/l.j. Dans les deux cas le pH est régulé à 6.5. Pour une charge de 36 g DCO/l.j sur le réacteur à lit fixé, les acides volatils commencent à s'accumuler et le rendement en biogaz diminue. Au delà de 36 g DCO/l.j, le système se déséquilibre.

Patel et col. (7) ont comparé différents types de support dans un réacteur à lit fixé upflow : charbon actif, graviers, pierre ponce, morceaux de brique, pièces de PVC. Les performances observées sont proches, de 68% à 77% de dégradation de la DCO, avec toutefois un optimum avec le charbon actif.

L'étude la plus complète, de Malaspina et al (8), a été réalisée dans le cadre d'un programme mené par l'ENEA (Agence Italienne pour les Nouvelles Technologies pour l'Energie et l'Environnement) pour les petites et moyennes fromageries. Le concept était le suivant : traiter le lactosérum pur par digestion puis réaliser un traitement de finition aérobie sur l'effluent digéré en mélange avec les eaux de lavage. L'étude a consisté à comparer les performances de plusieurs types de technologies.

Le lactosérum pur est réputé difficile à traiter du fait de sa concentration élevée, de sa haute biodégradabilité et de son manque d'alcalinité. Les observations de Hickey et al (9) laissent supposer que, dans ces conditions, la granulation ne se fait pas spontanément, ce qui rend difficile l'utilisation des systèmes UASB. Trois systèmes ont été comparés :

1. un réacteur upflow hybride à lit fixé, contenant un filtre polyuréthane orienté dans sa partie supérieure. Ce système a bien fonctionné dans un premier temps avec un rendement de dégradation de la DCO de 95%, jusqu'à une charge de 10 g DCO /l.j. Puis après une acidification consécutive à une panne de recirculation, le système n'a jamais recouvré un fonctionnement normal : les Acides Gras Volatils (AGV) s'accumulaient dès 1 g DCO/l.j. Ce déséquilibre a été interprété comme une modification irréversible dans les populations microbiennes, due à l'introduction de petit-lait pur sans recirculation.
2. un procédé à deux étapes, avec deux réacteurs de type « contact anaérobie » en série. Le rapport de volumes utiles entre le premier réacteur d'acidification et le deuxième réacteur de méthanisation était de 1 :5. Ce système a bien fonctionné mais a été limité à une charge de 3 g DCO/l.j. : comme prévu ce type de procédé ne peut supporter une très forte charge
3. un procédé à deux étapes avec un premier réacteur downflow à lit fixé, suivi d'un deuxième réacteur upflow hybride à lit fixé. Les deux réacteurs ont un support polyuréthane orienté. Le rapport de volume entre les deux réacteurs est de 1:5. Le pH est régulé par addition de bicarbonate de soude. Au delà d'une charge de 10 g DCO/l.j les AGV se sont accumulés. Cette acidification est attribuée à un défaut de design au niveau de la circulation gaz/liquide/solide, due à la production très importante de biogaz. Pendant la période stabilisée à 10 g DCO/l.j, le rendement en méthane était de 330 litres/kg DCO introduite, avec une teneur en méthane du biogaz de 53%.

Yilmazer et col (10) ont recherché les paramètres optimaux pour la méthanisation du petit-lait avec un procédé à deux étapes, avec le réacteur d'acidification infiniment mélangé et le réacteur de méthanisation un filtre anaérobie upflow. Le substrat utilisé est de la poudre de petit-lait diluée à 20 g/l de DCO, complétée avec des sels d'ammonium et de phosphate plus une solution trace. L'optimum d'acidification a été obtenu pour un TRH de 24 heures et une charge de 20 g DCO/l.j. Les conditions optimales de fonctionnement du filtre anaérobie était un TRH de 4 jours pour une charge de 11 g DCO/l.j. On observe alors un rendement en biogaz de 550 litres/kg DCO dégradée et 90% de dégradation de la DCO soluble

Notons que la plupart des expérimentations en laboratoire à forte charge a été réalisée sur des réacteurs à lit fixés (ou filtres anaérobies). La séparation en deux étapes est également souvent utilisée.

C.1.3 L'application industrielle

Un certain nombre d'installations de méthanisation en Europe traitent des eaux usées de laiterie et de fromagerie. Mais il s'agit principalement d'eaux de lavage (eaux blanches) avec peu de lactosérum, ce dernier étant généralement récupéré pour être valorisé, brut ou après ultra-filtration pour les grandes fromageries. De fait les eaux usées traitées ont des concentrations en pollution faibles en comparaison du lactosérum, comme le montre le tableau 5 (11).

	DCO (mg/l)	DBO ₅ (mg/l)	MES (mg/l)	NTK (mg/l)
Fromagerie avec récupération du sérum	3'500	2'000	500	50
Beurre avec récupération du sérum	2000	1000	300	30
Caséinerie	3500	2000	5000	50

Tableau 5 : Caractéristiques moyennes de la production de pollution pour quelques produits à base de lait, exprimées en concentration dans l'effluent

Parmi les installations en fonctionnement, citons en France les réalisations récentes de Nans-sous-Ste Anne (Doubs) et de l'Abbaye de Tamié (Savoie), toutes deux réalisées par le constructeur Vor Environnement avec un procédé UASB.

Dans la première, le sérum est valorisé en alimentation porcine : la DCO de l'effluent à traiter varie de 1'000 à 6'000 mg/l, avec une moyenne à 2'800 mg/l environ. Les résultats de l'essai pilote avaient montré un rendement de dégradation de 80% sur la DCO totale dans le méthaniseur (12). Dans la seconde le lactosérum est mélangé aux eaux blanches, constituant un effluent résultant de 20'000 à 30'000 mg/l. L'installation a démarré en 2003 et les premiers résultats font état d'une dégradation de plus de 90% de la DCO et d'une production de biogaz de 660 l/kg DCO traitée. Ce dernier est valorisé dans une chaudière qui alimente en eau chaude la fromagerie et les locaux d'habitation.

En Suisse, l'installation Emmi de Dagmersellen (LU) a été réalisée par Alpha Umwelttechnik avec le procédé BIOPAQ®- IC (système UASB avec une circulation interne des fluides optimisée). La DCO de l'influent est de 3'500 mg/l en moyenne. Mise en service en 1999, les résultats observés en 2001 faisaient état d'une dégradation de la DCO de 60%. Cette faible performance était attribuée à la précipitation des protéines, incompatible avec le procédé choisi.

En Irlande, une installation traite les eaux d'une laiterie avec un procédé à lit fixé avec support plastique (Proserpol). L'influent a une concentration de 6'000 à 8'000 mg/l de DCO et le rendement de dégradation est de 80%.

A notre connaissance il n'y a aucune publication décrivant une installation industrielle de méthanisation traitant du lactosérum pur.

C.2 ETUDE EXPERIMENTALE

L'installation pilote a été mise en place sur la fromagerie ANDRE à Romanel-sur-Morges. Cette fromagerie produit, selon la saison, du Reblochon, du Vacherin Mont d'Or, de la tomme et de la mozzarella.

C.2.1 Le bio-réacteur

Le bioréacteur pilote a été fourni par la société PROSERPOL. Il s'agit d'un méthaniseur de type « lit fixé », c'est à dire où les bactéries sont fixées sur un support immobile. Dans ce cas le support est constitué par des morceaux de tube plastique, d'une densité un peu supérieure à l'eau : le Flocor ®. Le volume de liquide total dans le réacteur est de 1 m³ environ et le volume de support est de 800 litres. Le coefficient de vide du Flocor est de 96% et sa surface spécifique est de 240 m²/m³.

Immobile durant le fonctionnement de la méthanisation, le support n'est cependant pas fixé : un dispositif de détassage par injection de gaz comprimé à la base du réacteur permet de mettre ponctuellement le support en expansion. Cela permet de prévenir les phénomènes de colmatage.

Le flux est descendant, et réparti par une rampe d'aspersion située au sommet du réacteur. Le liquide digéré est évacué par le bas du réacteur relié à un système de surverse, dont le niveau réglable permet de choisir également le niveau dans le réacteur.

L'alimentation est assurée par une pompe péristaltique depuis une cuve de stockage du petit-lait. Une recirculation du liquide digéré du bas du réacteur vers le haut est assurée par une deuxième pompe du même type.

La température est maintenue par deux résistances électriques situées dans la partie basse du réacteur, en dessous du support.

Une représentation schématique du dispositif est reportée sur la figure 9.

C.2.2 Les mesures

Sur le biogaz

Le volume de biogaz est mesuré par un compteur à gaz et relevé chaque jour.

La composition du gaz est analysée en ligne par un système infra-rouge à deux cellules de mesures : CO₂ et CH₄.

Les teneurs en H₂S et NH₃ sont mesurées ponctuellement à l'aide de tubes Dräger.

Dans le bioréacteur

Le pH est mesuré dans le réacteur par une électrode en place située dans le tiers inférieur du liquide. L'électrode peut être retirée et est étalonnée chaque semaine.

La température est mesurée par un capteur situé dans le réacteur.

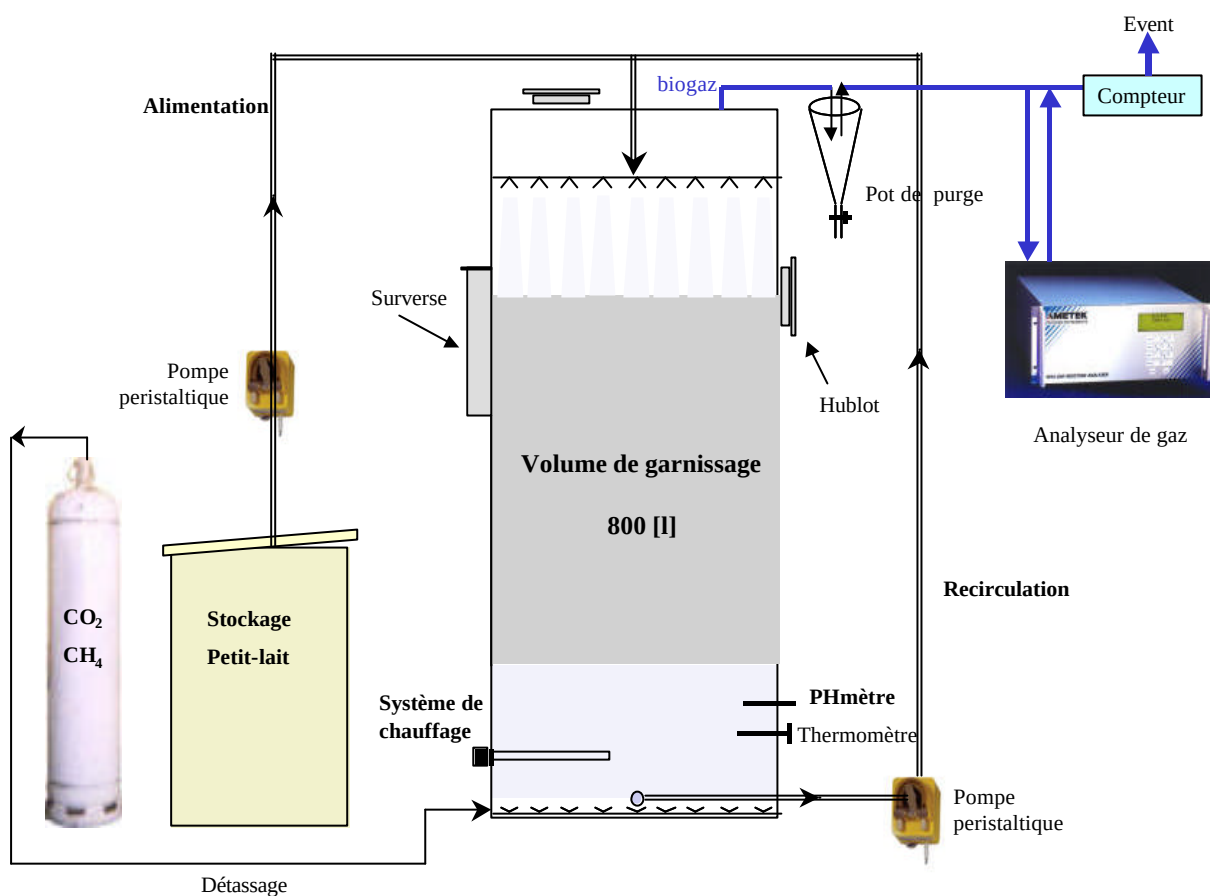


Figure 9 : Schéma du dispositif expérimental de méthanisation du petit-lait

Sur le petit-lait frais et l'effluent digéré

Des échantillons de petit-lait frais et d'effluent digéré sont prélevés 1 à 3 fois par semaine pour analyses au Laboratoire de Biotechnologie Environnementale de l'EPFL et au Laboratoire de Provimi Kliba. L'effluent est prélevé à la sortie du bio-réacteur au niveau de la surverse.

Le suivi analytique est visualisé dans le tableau 6 .

Les méthodes d'analyses utilisées sont les suivantes :

- Matière sèche : par dessiccation à 100°C
- Demande chimique en oxygène (DCO) : par photométrie avec kits DCO
- MES : par centrifugation à 5'000 g et dessiccation
- Acide gras volatils et ac. lactique : par chromatographie en phase liquide (HPLC)
- Alcalinité : par colorimétrie avec kits Titrets pour alcalinité (TAC)
- N ammoniacal : par colorimétrie, avec kits Titrets pour ammonium
- Lactose, protéines, matières grasses, N, P, Ca, Na : réalisées au laboratoire d'alimentation animale de Provimi Kliba

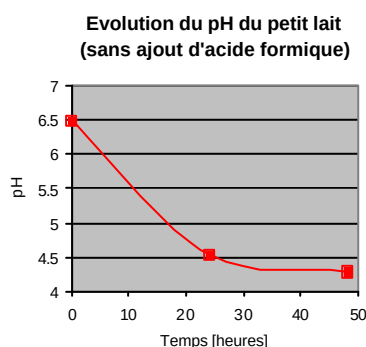
Analyse	Petit-lait frais	Petit-lait digéré
Matière sèche (MS)	2 x mois	1 x sem *
Matière en suspension (MES)		1 x sem *
Demande Chimique en Oxygène (DCO)	1 x sem	1x sem
Azote ammoniacal (N-am)		1 x sem
Ac.Gras Volatils (AGV) et ac. lactique	1 x mois	2 x sem
Alcalinité		2 x sem
Lactose		
Matières grasses		
Protéines totales	1 x mois	1 x mois *
Matière organique /minérale		
P, Ca, Na		

* en périodes de fonctionnement stabilisé

Tableau 6 : Suivi analytique sur le petit-lait frais et digéré

C.2.3 L'alimentation du bio-réacteur

Le petit-lait frais est prélevé trois fois par semaine à la sortie de la centrifugeuse destinée à récupérer les graisses résiduelles. Il s'agit donc de petit-lait dégraissé. La production de petit-lait centrifugé se fait durant quelques heures sur la journée.



En l'absence de réfrigération ou de traitement complémentaire, le petit-lait donne lieu spontanément et très rapidement à une fermentation lactique. L'évolution spontanée du pH du petit-lait à température ambiante est reportée sur la figure 10.

Figure 10 : Evolution spontanée du pH du petit-lait

Afin d'éviter ces phénomènes fermentaires, dont on ne connaît pas l'impact sur la digestion anaérobie ultérieure notamment en termes de modification de flore microbienne, le petit lait est stabilisé. Parmi les méthodes utilisées pour la stabilisation avant affouragement porcin (réfrigération, addition d'eau oxygénée, etc...) on a retenu l'addition d'acide formique à 1‰ environ comme la plus compatible avec la valorisation par méthanisation.

Le pH initial du petit-lait doux est de 6.5 et est abaissé à 4.0. On vérifie que la production d'acides est négligeable durant les jours suivants : voir figure 11. Le petit-lait est alors stocké dans la cuve d'alimentation de 500 litres à température ambiante.

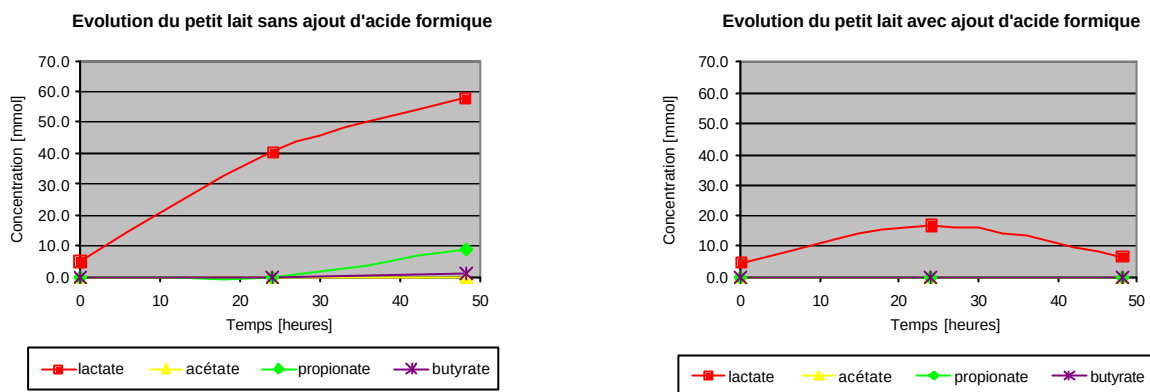


Figure 11 : Production d'acides durant le stockage du petit-lait

C.2.4 Paramètres de fonctionnement

Le petit-lait est introduit **sans aucune dilution**, en continu 24 heures par jour et 7 jours par semaine.

La température de fonctionnement est régulée entre 36 et 40°C. Le pH est maintenu au dessus de 7.0 par addition ponctuelle et manuelle de bicarbonates de soude dans le réacteur.

L'alimentation en petit-lait est caractérisée par la charge organique volumique (COV) du réacteur, exprimée en kg DCO du petit-lait par m³ de support et par jour.

Le temps de séjour hydraulique (en jours) est exprimé par rapport au volume de liquide total dans le bio-réacteur. La vitesse de recirculation, exprimée en m/h, est choisie selon les recommandations du constructeur pour assurer un fonctionnement hydraulique satisfaisant.

C.3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le fonctionnement du bio-réacteur sur l'ensemble de la période d'expérimentation est présenté en annexe 1 : figures 1.1 à 1.8.

C.3.1 Calendrier de l'essai

Nov 03	Dec 03	Janv 04	Fev 04	Mars 04	Avril 04	Mai 04
mise en place du pilote	démarrage et stabilisation de la digestion			optimisation des paramètres de fonctionnement et définition des performances		

C.3.2 Composition du petit-lait frais

La composition moyenne (sur 6 mesures) du petit-lait frais est reportée dans le tableau 7.

On remarque que la teneur en graisses est très faible, 0.2 g/l : la centrifugation joue donc bien son rôle. La concentration en DCO est très élevée : plus de 70 g O₂/l, soit dans la fourchette haute des valeurs rapportées dans la littérature.

Matière sèche (MS)	g/l	60
Matière sèche organique	g/l	55
DCO totale	g O ₂ /l	71
Protéines totales	g/l	8
Graisses totales	g/l	0.2
Lactose	g/l	39
Calcium (Ca)	g/l	0.4
Phosphore (P)	g/l	0.4
Sodium (Na)	g/l	0.5

Tableau 7 : Composition moyenne du petit-lait

C.3.3 Première partie : démarrage et stabilisation de la méthanisation

Ensemencement du bio-réacteur

Afin d'ensemencer le support avec une flore microbienne anaérobie, des boues digérées ont été prélevées à la sortie du digesteur de la station d'épuration urbaine de Morges. Ces boues sont introduites dans le réacteur après dilution à l'eau et passage sur un tamis. La teneur en matière sèche finale est d'environ 10 g/l.

Démarrage

Après l'ensemencement par les boues de step, le petit-lait est introduit avec une charge très faible afin d'acclimater l'éco-système : ainsi durant le premier mois le petit-lait est introduit ponctuellement dans le bio-réacteur.

Durant cette période de nombreux réglages sont intervenus. La teneur en méthane trop faible nous a conduit à rajouter un deuxième lot de boues digérées afin d'augmenter l'ensemencement en bactéries méthanogènes. Finalement après quatre semaines l'alimentation est effectuée en continu.

Stabilisation

Durant cette période l'alimentation en petit-lait est augmentée progressivement tout en surveillant les paramètres qui témoignent de l'équilibre de la méthanisation, à savoir les concentrations en acides gras volatils et la teneur en méthane dans le biogaz. Le pH est maintenu au dessus de 7.0 par addition ponctuelle de bicarbonate de soude dans le réacteur.

On observe une accumulation d'acétate dès que l'on atteint une charge organique de 3.5 kg DCO/m³.j : voir figures 12 et 13. Malgré le maintien de la charge à une valeur basse de 4 kg DCO/m³.j, l'acétate continue à s'accumuler jusqu'à 40 mM, tandis que la teneur en méthane dans le biogaz est légèrement inférieure à 50% (voir annexe 1.3). Ceci témoigne d'une inhibition de la croissance des bactéries méthanogènes transformant l'acide acétique en méthane.

Compte tenu de la faible charge et des autres paramètres de suivi, cette inhibition nous paraît due à une carence en éléments indispensables à la croissance des micro-organismes. Le petit-lait étant plutôt riche en éléments nutritifs, on peut penser plutôt à un ou plusieurs éléments traces métalliques. Aussi une solution d'éléments métalliques (solution usuellement utilisée pour les milieux de culture anaérobies) est ajouté dans le bio-réacteur : la composition est reportée en annexe 2. Dès le lendemain l'acide acétique est consommé : tout se passe comme si les bactéries méthanogènes recommençaient à pousser normalement.

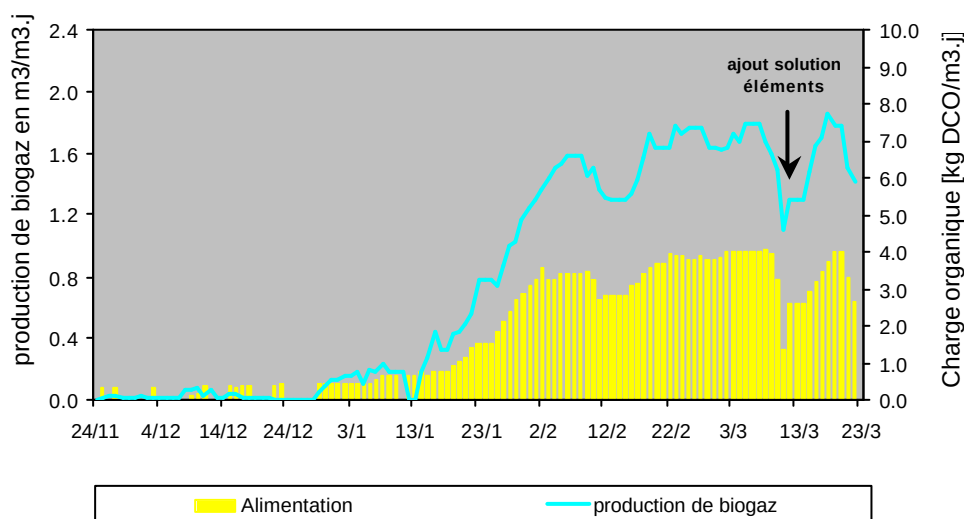


Figure 12 : Evolution de la charge organique et de la production de biogaz

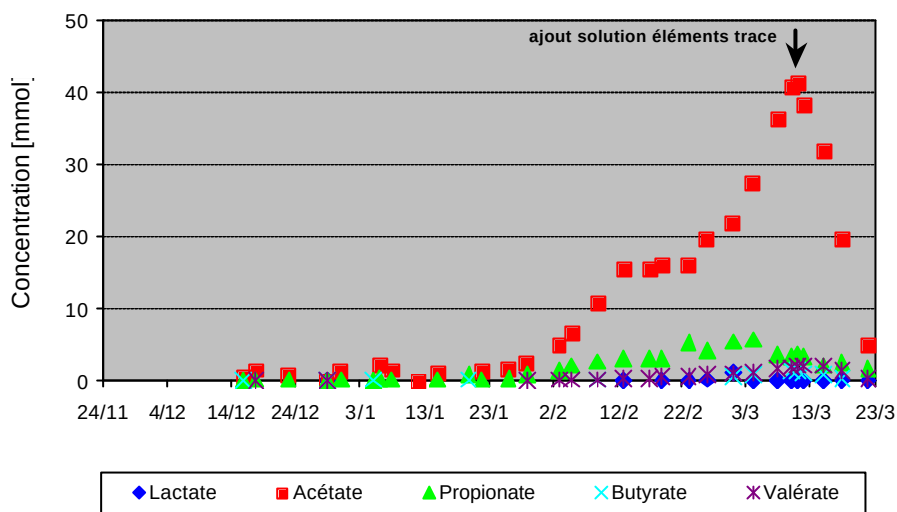


Figure 13 : Evolution des concentrations en acides gras volatils et lactique

C.3.4 Deuxième partie : optimisation du fonctionnement

Paramètres de fonctionnement et rendement en biogaz

La charge en petit-lait est alors augmentée progressivement de 4 à 20 kg DCO/m³.j, ce qui correspond à une quantité finale de petit-lait traitée de 300 litres par m³ de support de réacteur et par jour. La solution métallique est ajoutée à raison de 4 g MS/m³ de petit-lait.

La production de gaz augmente, proportionnellement à la charge, comme on peut le visualiser sur la figure 14. On n'observe aucune accumulation d'acide acétique ou d'autres acides gras volatils, et une teneur en méthane supérieure à 50%, ce qui témoigne du très bon fonctionnement de la méthanisation (voir annexe 1.3 à 1.5) : le système demeure parfaitement équilibré. Seul l'arrêt de l'addition de l'acide formique dans le petit-lait, en fin d'expérimentation, provoque une accumulation de propionate : figure 15.

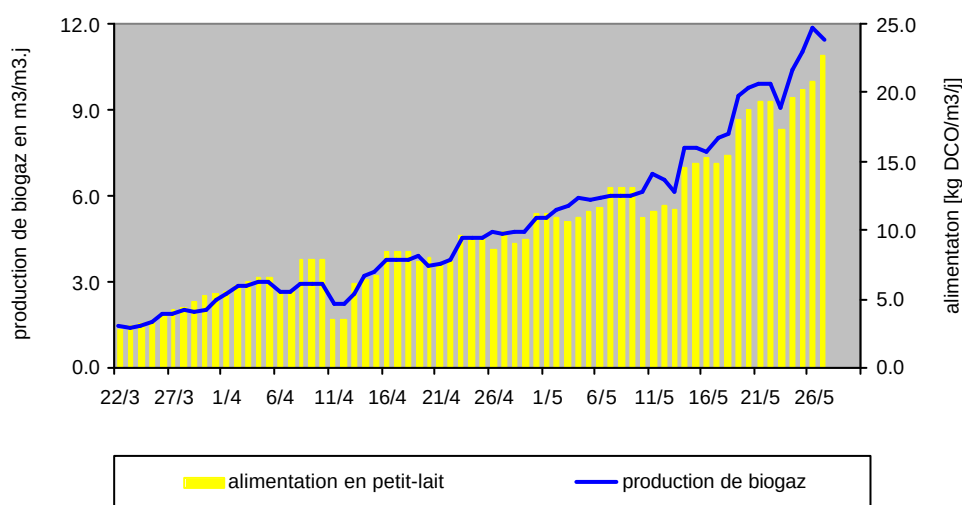


Figure 14 : Evolution de la charge organique et de la production de biogaz

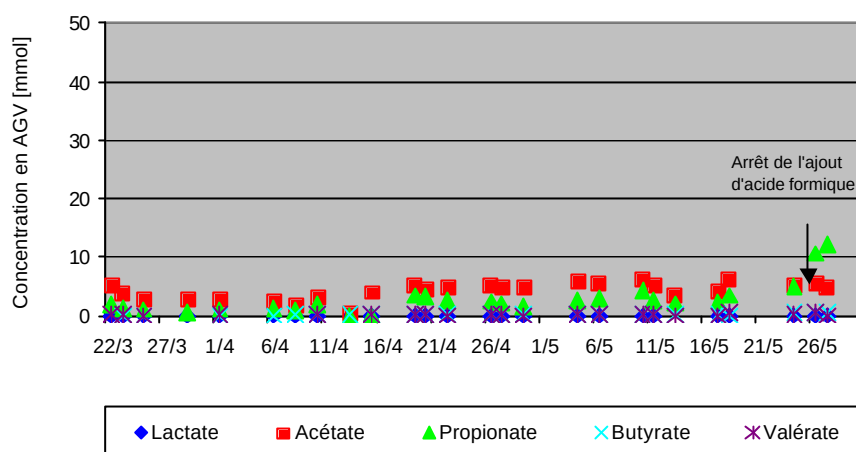


Figure 15 : Evolution des acides gras volatils et lactique

Le rendement en méthane, exprimé en % du rendement maximum théorique de 350 litres CH_4 /kg DCO, varie entre 80% et 100 %. On voit sur la figure 16, que le rendement ne diminue pas quand la charge augmente : au contraire il a tendance à se stabiliser à une valeur haute, ce que l'on peut attribuer à l'adaptation de la flore microbienne au cours du temps, phénomène bien connu dans les processus biologiques.

La dégradation de la DCO varie de 85% à 95% (voir annexe 1.6 et 1.7). La lactate est complètement dégradé : sa concentration dans l'effluent est au-dessous du seuil de mesure.

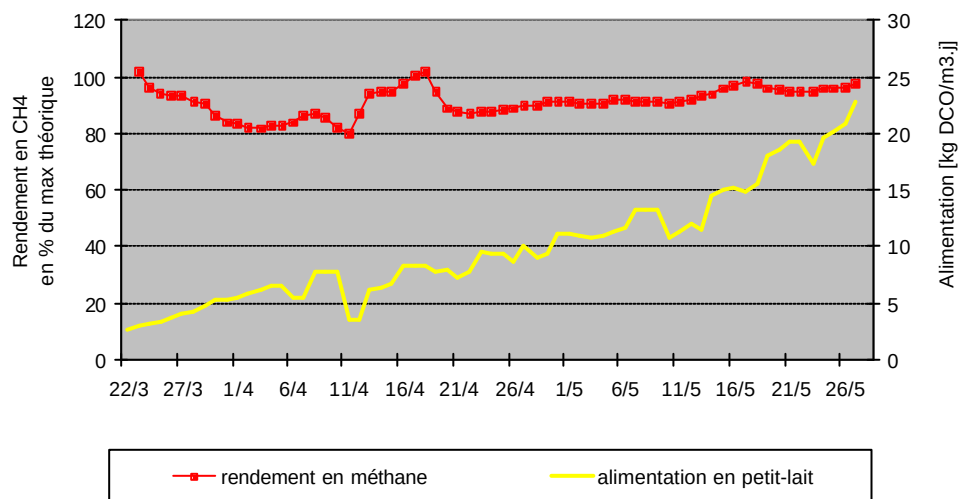


Figure 16 : Evolution du rendement en méthane

Composition du biogaz

La teneur en méthane du biogaz est stable à 51% en moyenne (voir annexe 1.3). En fin de période stabilisée à forte charge, la teneur en H_2S mesurée ponctuellement varie de 800 à 1200 ppm (vol/vol), avec une moyenne à 1000 ppm. Cette valeur élevée est due à la richesse en soufre du petit-lait. La teneur en ammoniac est négligeable.

Les performances obtenues sont résumées dans le tableau 8.

Période	1	2	3	4	5
Charge organique (kg DCO/m ³ .j)	5.2	7.5	10.2	13.3	19.6
Temps de rétention hydraulique (jours)	21.2	11.8	8.7	6.8	4.8
Vitesse de recirculation (m/h)	0.28	0.28	0.30	0.36	0.36
Taux de recirculation (m ³ recir/m ³ réacteur.j)	4.5	4.5	4.8	5.7	5.7
Production de biogaz (m ³ /m ³ réacteur.j)	2.3	3.5	5.1	6.9	10.3
Rendement en biogaz (m ³ /kg DCO _{in})	580	592	629	649	660
Rendement en biogaz (m ³ /m ³ petit-lait)	46.9	41.4	44.4	46.3	48.6
Teneur en CH ₄ du biogaz	53.0	52.5	50.9	50.8	51.3
Rendement en méthane (m ³ /kg DCO _{intro})	309	310	320	330	339
Rdmt en méthane (% du max théorique)	88	89	92	94	97
Rendement de dégradation de la DCO (en%)	95	94	90	90	91
Rendement de dégradation du lactose	100	100	100	100	100

Tableau 8 : Paramètres de fonctionnement et performances

C.3.5 Valorisation de l'effluent digéré

La composition du petit-lait frais et digéré (périodes stabilisées) est reportée dans le tableau 9.

		Petit-lait frais	Petit-lait digéré
Matière sèche (MS)	g/l	60	13.3
Matière en suspension	g/l	1.4	6.8
Matière sèche organique	g/l	55	7.7
DCO totale	g O ₂ /l	71	6.5
Protéines totales	g/l	8	7.3
Graisses totales	g/l	0.2	0.2
Lactose	g/l	39	0
Calcium (Ca)	g/l	0.4	0.1
Phosphore (P)	g/l	0.4	0.3
Sodium (Na)	g/l	0.5	1.7

Tableau 9 : Composition du petit-lait avant et après méthanisation

Le taux de dégradation moyen de 91% sur la DCO totale, et de 86% sur la matière sèche organique. Le lactose est totalement dégradé. L'apparition de sodium est due à l'addition d'hydrogénocarbonate de sodium (ou bicarbonate de soude).

On observe que la teneur en protéines est inférieure de 10% seulement après digestion. On remarque également que les matières en suspension passent de 1.4 g/l avant la

méthanisation à 6.8 g/l après méthanisation. On a donc une formation de matière en suspension, qui correspond à :

g MES/ 100 g DCO dégradé :	8.4
g MES/ 100 g MSV dégradé :	11
g MES/ 100 g MS dégradé :	12

La quantité de matière en suspension qui apparaît correspond à la quantité théorique de biomasse microbienne formée au cours de la méthanisation (soit environ 10% de la matière organique). Tout se passe comme si on évacuait en fait les boues formées (biomasse essentiellement protéique) avec l'effluent digéré. Ceci pourrait s'expliquer par une vitesse de recirculation d'effluent élevée relativement aux dimensions du pilote, qui permettrait aux boues en excès de s'évacuer avec le flux continu sortant.

La valeur nutritionnelle de l'effluent n'est globalement pas bonne, mais surtout on peut aisément remarquer que son odeur, due aux acides gras volatils résiduels et à l'hydrogène sulfuré, le rend inappétent. Une valorisation en alimentation animale dans ces conditions n'est pas envisageable.

L'élimination de l'effluent peut s'envisager sur la station d'épuration municipale. Bien que la pollution ait été abattue de 90%, la DCO résiduelle est encore élevée : 6 à 7 g/l. Lors d'une application industrielle il faudra donc envisager éventuellement une épuration complémentaire avant rejet vers la station.

C.3.6 Aspects pratiques du fonctionnement

Variation de la température

Avec le système de chauffage utilisé sur le pilote, et compte tenu du fait que le pilote n'était pas isolé alors que la température ambiante était basse (local non chauffé et largement ouvert sur l'extérieur), il s'est avéré difficile de maintenir la température à la valeur souhaitée de 38 °C. Il est nettement apparu (voir annexe 1.2) qu'une baisse de température au dessous de 36°C avait une répercussion négative sur les performances de la méthanisation. Ce point devra être pris en considération lors d'une application industrielle.

Problème de moussage

Des problèmes de moussage sont apparus en fin d'expérimentation. L'addition d'un anti-mousse couramment utilisé dans les stations d'épuration urbaines, a résolu ce problème.

Colmatage du support

Comme décrit dans le dispositif expérimental, le bio-réacteur est rempli d'un support habituellement immobile, mais qui peut être mis en expansion momentanément par injection de biogaz sous légère pression à la base du réacteur. Après cette expansion, les particules décantables sont extraites du bio-réacteur par la purge située au point bas. Outre la prévention des phénomènes de colmatage, cela permet d'évacuer des boues excédentaires.

Ce protocole de détassage a été réalisé trois fois en début d'expérimentation, pour purger les inertes introduits avec les boues urbaines, puis trois fois au cours de la période de stabilisation.

A l'arrêt de l'expérimentation, des particules du support ont été prélevées et examinées à plusieurs niveaux dans le réacteur : on n'a décelé aucun précipité ni aucune accumulation de matière prise en masse, comme on peut le voir sur les photographies en annexe 3.

C.3.7 Conclusion de l'expérimentation

La méthanisation du petit-lait sans dilution, avec une concentration moyenne de 70 g/l de DCO, est validée dans les conditions suivantes :

- type de bio-réacteur : lit fixé avec dispositif d'expansion du support pour éviter les colmatages
- petit-lait stabilisé par l'acide formique durant le stockage
- température de fonctionnement de 36 à 40°C
- charge organique de 20 kg DCO/m³.j
- supplémentation en éléments traces métalliques (à optimiser)
- régulation du pH avec du bicarbonate de soude

Les performances obtenues dans ces conditions sont excellentes, soit :

- abattement de la DCO totale de 91%
- rendement en méthane de 340 litres/kg DCO_{in}, soit 97% du rendement maximum théorique
- production de 44 litres de biogaz et 22 litres de méthane, par m³ de petit-lait traité avec 70 g/l de DCO
- système parfaitement stable comme l'indique l'absence d'accumulation d'acides gras volatils, intermédiaires essentiels du processus de digestion

C.4 VALORISATION ENERGETIQUE DU BIOGAZ

C.4.1 Production de fromage et de petit-lait

La fromagerie André à Romanel-sur-Morges a été créée en 1978. La production annuelle est de 350 tonnes de fromages tous types confondus : Vacherin, Reblochon, Tomme, Mozzarella. Elle génère en moyenne 2800 m³ de petit-lait par an. L'entreprise assure la fabrication du fromage jusqu'à sa distribution en passant par son emballage. La société emploie entre 4 et 20 personnes selon la saison et travaille 5 à 7 jours par semaine.

Les variations mensuelles de production sont reportées dans le tableau 10. On constate que ces variations sont importantes puisque la production de fromage est de 14 tonnes au minimum en juillet et 55 tonnes au maximum en novembre, soit une variation de 1 à 3.5.

	Volume de lait transformé (m ³)	Production de fromages (tonnes)	Production de petit-lait (m ³)
Janvier	315	35	268
Février	215	24	183
Mars	164	18	140
Avril	144	16	122
Mai	139	15	118
Juin	135	15	115
Juillet	127	14	108
Août	158	18	135
Septembre	455	51	387
Octobre	489	54	416
Novembre	498	55	423
Décembre	432	48	367
Total	3'272	364	2'782

Tableau 10 : Variations mensuelles des production de fromages et de petit-lait

C.4.2 Analyse des consommations énergétiques de la fromagerie

Seuls l'électricité et le mazout sont utilisés pour satisfaire les besoins de la fromagerie et des habitations attenantes. Les besoins énergétiques sont importants : le poste énergie est la charge financière la plus importante, après les salaires, dans le fonctionnement de l'entreprise.

L'analyse énergétique est réalisée sur les données de l'année 2003. L'exploitant estime que la canicule de l'année 2003 n'a pas provoqué de variation importante dans la consommation, ce qui a été vérifié avec les chiffres globaux de l'année 2002.

Besoins thermiques

L'ensemble des besoins thermiques est satisfait par le mazout. Une chaudière de 166 kW alimente en eau chaude (80°C) les chaînes de production et le logement des trois familles vivant dans les locaux. Une chaudière de 526 kW génère de la vapeur à 160°C sous 8 bars pour la stérilisation et le nettoyage. La consommation maximale est atteinte pendant les mois d'octobre à janvier. Le volume de mazout consommé en 2003 était de 65'182 litres. Les variations mensuelles sont reportées dans le tableau 11.

Besoins en électricité

Parmi les matériels les plus énergivores, on note la présence de 9 groupes frigorifiques à détente directe, 3 tanks à lait réfrigérés de 8'000 litres chacun, un groupe frigorifique de 6.2 kW destiné à produire de l'eau glacée, une centrifugeuse de 15 kW sans démarrage progressif pour l'écémage du petit-lait, 3 pompes volumétriques de transfert de lait totalisant 6 kW. D'autres matériels comme les agitateurs dans les tanks ou les brasseurs dans les salles de production s'ajoutent à ces consommateurs.

La consommation électrique globale en 2003 était de 137 MWh, avec un maximum entre octobre et janvier. Les variations mensuelles sont reportées dans le tableau 11.

	Electricité		Mazout	
	Heures pleines (kWh)	Heures creuses (kWh)	Volume en litres	Energie en MWh
Janvier	11392	4762	8000	89
Février	8978	3528	6140	68
Mars	6814	2838	4700	52
Avril	7026	2794	3000	33
Mai	6370	2176	2500	28
Juin	5642	2060	2500	28
Juillet	6966	2916	2500	28
Août	6680	2882	3090	34
Septembre	9156	3384	8000	89
Octobre	10808	4528	8290	92
Novembre	10934	3892	8220	92
Décembre	7492	3288	8240	92
Total	98 MWh	39 MWh	65'180 litres	726 MWh _{maz}
	137 MWh _{el}			

Tableau 11 : Variations mensuelles des consommations énergétiques

Dépendance entre consommations énergétiques et production de fromage

On a pu observer des variations importantes au cours de l'année, tant au niveau de la production que des consommations énergétiques. Les résultats mensuels ont été convertis en pourcentage par rapport à la moyenne annuelle pour mieux tenir compte des variations et permettre de superposer les courbes. Les résultats sont illustrés sur la figure 17.

Concernant la consommation de mazout la dépendance est très bonne. Concernant la consommation électrique, la dépendance est visible mais les variations ne sont pas si

importantes qu'attendu. Le responsable de production confirme que les chambres froides, responsables d'une part importante de la consommation, sont utilisées en fonction de la production (seule une partie des chambres froides est en fonction durant l'été). On peut émettre l'hypothèse que les températures estivales élevées expliquent une surconsommation électrique à cette période.

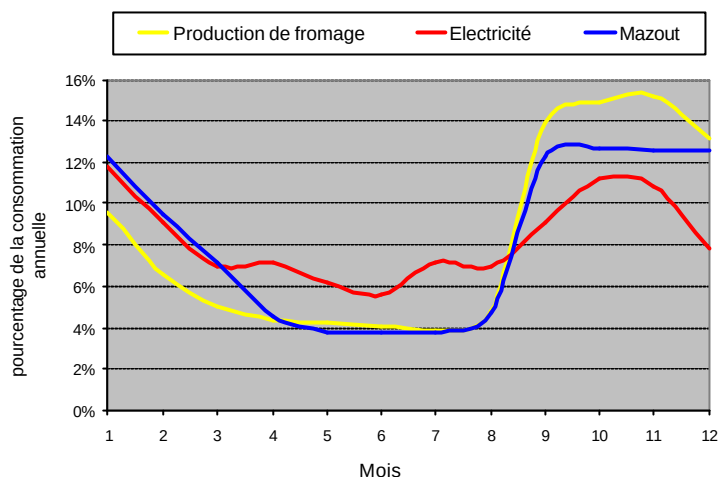


Figure 17 : Variations relatives de la production de fromage et des consommations énergétiques

Profil des consommations de chaleur

L'établissement du profil des consommations de chaleur va permettre d'étudier les solutions de gestion de l'énergie. En l'absence de relevés des appels de puissance journaliers on fixera un profil déterminé à partir des données de la littérature.

Concernant le chauffage des habitations les statistiques donnent, pour un bâtiment tertiaire d'après 1975, des consommations de chauffage de l'ordre de 200 kWh/m².an. Etant donnée la température intérieure des salles de production (23°C), et les salles d'emballage chauffées dont les portes restent ouvertes, les consommations pour le chauffage sont estimées à 250 kWh/m².an et 40 kWh/m³.an pour l'eau chaude. La surface chauffée de la fromagerie est de 680 m² et la surface habitable de 340 m². La période de chauffage est de 210 jours en Suisse romande, soit octobre à mai. Le profil journalier des consommations de chaleur est de type « logement collectif ».

En ce qui concerne la production fromagère, l'ensemble des opérations de pasteurisation, chauffage, stérilisation et nettoyage consommations s'effectue entre 7h et 15h. Ne possédant pas de relevés séparés, les consommations sont obtenues par déduction des autres consommations.

Les variations de consommation au cours de la journée (périodes de production et de non production) sont illustrées sur la figure 18 pour une année. On voit que la tranche horaire 7h-15h représente entre 70% (en hiver) et 95 % (en été) de la consommation journalière globale.

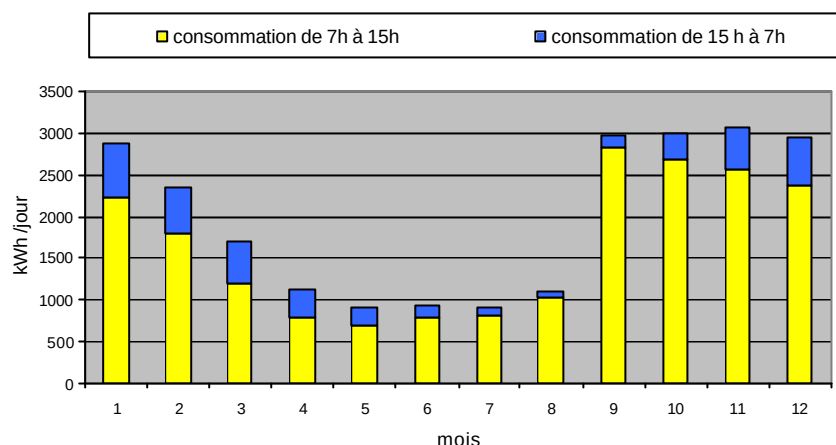


Figure 18 : Variations mensuelle et quotidienne des consommations de chaleur

C.4.3 Valorisation du biogaz

Production de biogaz et consommations énergétiques

A partir des résultats de l'étude expérimentale on peut facilement calculer la production attendue de biogaz à partir des quantités de petit-lait produit, et la mettre en relation avec les consommations énergétiques. La figure 19 donne une vision de l'adéquation entre l'énergie consommée par la fromagerie (électricité et mazout) et l'énergie du biogaz produit par la méthanisation du petit-lait. On constate que l'énergie disponible à partir du biogaz suit les variations de la consommation énergétique de l'installation, étant donné la dépendance entre la production de fromage et consommations de la fromagerie. Cette adéquation est particulièrement bonne entre production de biogaz et consommation de fioul et d'autant plus intéressante que les mois les plus consommateurs sont les mois froids.

Les consommations totales annuelles de mazout et d'électricité sont de $726 \text{ MWh}_{\text{mazout}}$ et $137 \text{ MWh}_{\text{elec}}$, tandis que l'énergie totale du biogaz correspond à $612 \text{ MWh}_{\text{gaz}}$.

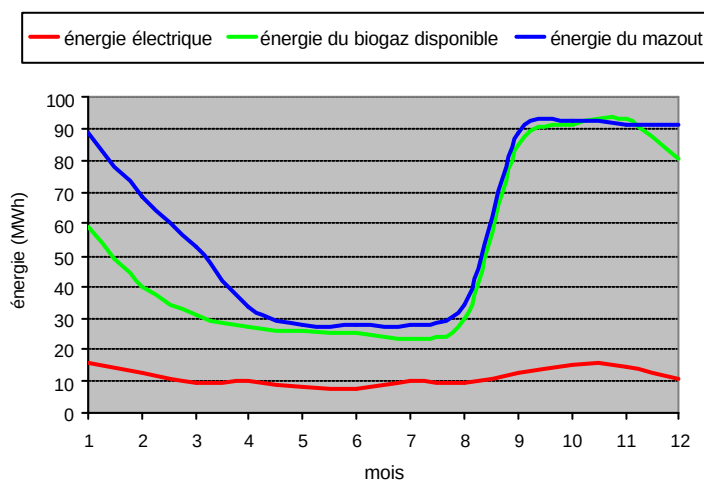


Figure 19 : Energies consommées par la fromagerie (électricité et mazout) et énergie du biogaz produit

Deux scénarios de valorisation seront abordés : co-génération électricité-chaleur et valorisation purement thermique.

Valorisation par co-génération

Le dimensionnement du groupe est réalisé sur les pics de production de manière à consommer tout le biogaz produit. On choisit un couplage chaleur-force (CCF) de 35 kW électriques, par exemple le modèle FMB 43 KSM de chez Schmidt Enertec GmbH. Les durées de fonctionnement du groupe selon les périodes de l'année sont établis selon cette puissance.

Le CCF a les caractéristiques suivantes :

- puissance électrique 35 kW
- rendement électrique : 33%
- puissance thermique récupérable 57 kW
- rendement thermique 54%
- puissance combustible primaire 107 kW
- débit de biogaz (à 50% ce CH₄) 21.2 m³/h

Les productions de chaleur et d'électricité sont ventilées sur l'année dans le tableau en annexe 4. Les figures 20 a) et b) illustrent les productions et consommations d'électricité et de chaleur.

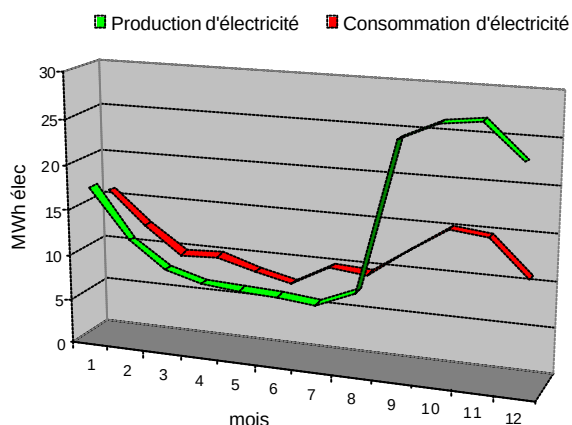


Figure 20 a) : Variations mensuelles de la consommation et de la production d'électricité par le CCF

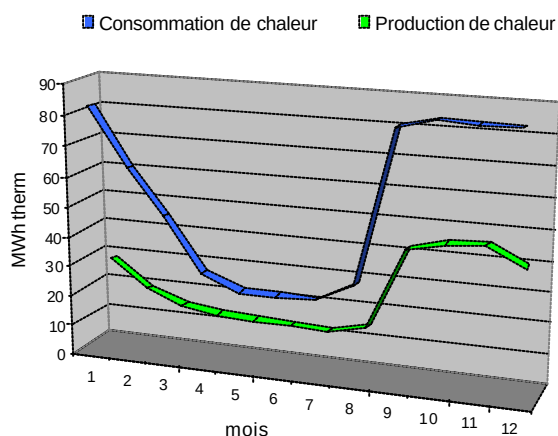


Figure 20 b) : Variations mensuelles de la consommation et de la production de chaleur par le CCF

La production d'électricité est excédentaire par rapport à la consommation de la fromagerie pendant la période de forte production de fromage (donc de petit-lait). Au contraire la chaleur produite par le CCF est insuffisante pour couvrir les besoins de la fromagerie, particulièrement pendant la période hivernale de forte production.

Les heures de fonctionnement du couplage chaleur force peuvent être calculées en fonction du débit quotidien attendu de biogaz : elles varient selon la saison entre 7h et 26 h pour un débit de biogaz qui varie de 5.2 à 21.2 m³/h. On voit donc que :

- d'une part pendant les mois de forte production une partie du biogaz ne pourra pas être valorisé dans le CCF choisi, ce qui obligerait à disposer d'une torchère ou bien à surdimensionner le groupe
- d'autre part durant les mois de faible production le biogaz devra être stocké durant l'arrêt du CCF, ce qui oblige à disposer d'une capacité de stockage estimée à environ 130 m³.

En conclusion on peut dire que ce mode de valorisation n'est pas bien adapté à un flux de biogaz qui varie dans de telles proportions.

Valorisation thermique

On a vu précédemment que la variation d'énergie disponible du biogaz suit fidèlement la variation de consommation de mazout, tout en étant toujours légèrement déficitaire. Cela signifie que dans ce cas le biogaz peut être entièrement valorisé sans nécessité de stockage pour compenser une variation saisonnière.

Il n'en est pas de même en ce qui concerne les variations horaires : en effet le débit de biogaz est constant sur la journée, l'alimentation du digesteur étant continue, alors que la consommation de chaleur est concentrée sur la durée de production c'est à dire entre 7h et 15h. Il faut donc trouver un moyen de stocker l'énergie .

Plusieurs solutions sont envisageables et peuvent se combiner entre elles :

- stocker le biogaz pour le brûler pendant les heures de forte demande
- brûler les biogaz en continu et utiliser l'hydro-accumulation pour stocker la chaleur

L'étude des débits de biogaz au cours de l'année ainsi que de l'énergie disponible va permettre de dégager un scénario de valorisation et de conclure sur un mode de conduite. Compte tenu de la consommation thermique importante et des appels de puissance dus au fonctionnement de machines comme la génératrice de vapeur, un appoint de mazout est de toute façon indispensable.

Le mode de stockage retenu ici est l'hydro-accumulation qui permet de réduire les volumes de stockage : ainsi un ballon de 10 m³ d'eau à 90°C utilisable jusqu'à 20°C correspond à un ballon de biogaz (50% CH₄) de 160 m³ à pression atmosphérique.

Le schéma de la solution de gestion de l'énergie est représenté sur la figure 21.

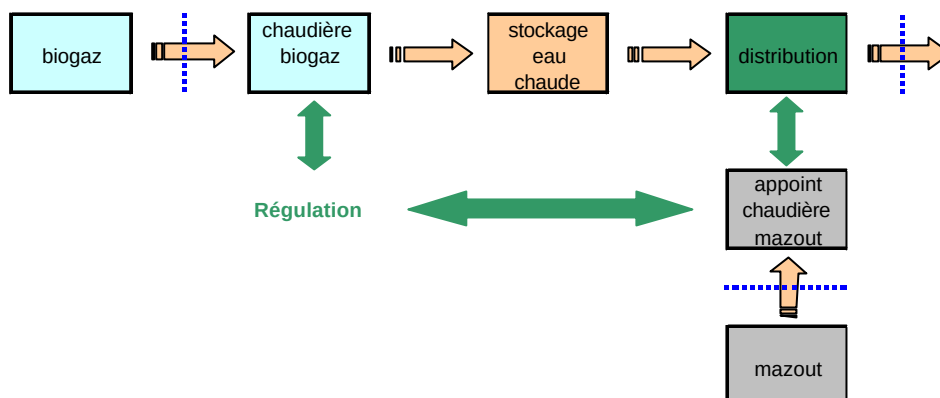


Figure 21 : Schéma de la solution de gestion de l'énergie

Pour le dimensionnement du volume de stockage, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- le volume d'hydro-accumulation travaille entre 20°C et 95°C (température moyenne du réseau : 10°C)
- l'efficacité du ballon est de 90%, pertes comprises
- la chaudière biogaz fournit de l'eau à 95°C
- le rendement de la chaudière biogaz est de 92%
- la chaudière fioul réalise, si besoin est, l'appoint pour élever l'eau à la température de consigne
- l'eau préchauffée est également utilisée dans la chaudière vapeur

D'après le tableau 12, obtenu à partir des profils de consommations de chaleur journaliers et annuels, et de la variation de la production de biogaz, on peut déduire le volume d'hydro-accumulation requis.

	débit de biogaz m ³ /h	débit de biogaz kWh/h	énergie à stocker kWh/j	volume d'eau de stockage en m ³
Janvier	13	65	398	5
Février	9.5	47	188	3
Mars	6.8	34	40	1
Avril	6.1	31	160	2
Mai	5.7	29	257	3
Juin	5.7	29	315	4
Juillet	5.2	26	330	4
Août	6.5	33	433	6
Septembre	19.3	97	1404	19
Octobre	20.1	101	1315	18
Novembre	21.2	106	1201	16
Décembre	17.8	89	824	1

Tableau 12 : Calcul des volumes nécessaires d'hydro-accumulation

On voit qu' un ballon de 20 m³ permet de valoriser au mieux la totalité du biogaz. C'est donc cette solution qui est retenue pour l'installation.

Le système de combustion devra avoir une puissance modulable entre 50 kW et 150 kW. Dans ces conditions les variations de consommation de chaleur et de production à partir du biogaz sont représentées sur la figure 22.

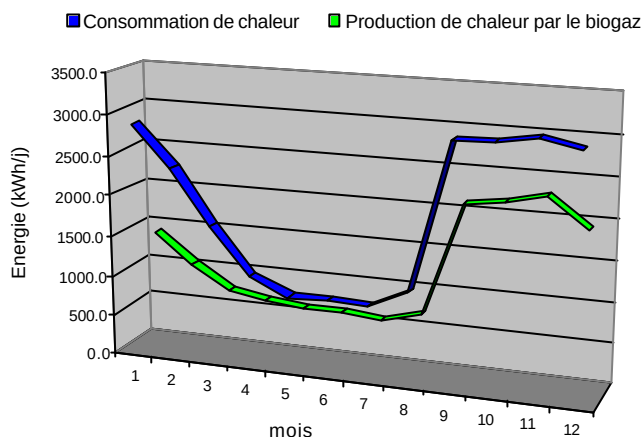


Figure 22 : Profils des consommations et chaleur et de la production à partir de biogaz

Au niveau énergétique, le bilan annuel s'établit comme suit :

- Consommation initiale de mazout : 65'180 litres
- Substitution par le biogaz : 44'650 litres

La valorisation thermique du biogaz produit à partir du petit-lait permet donc, dans le cas de cette fromagerie, de substituer 68% du mazout consommé.

C.4.4 Modélisation des flux de matières et d'énergie de l'installation proposée

A partir des résultats de l'expérimentation sur pilote et de l'analyse de la valorisation du biogaz, on définit une installation type et on modélise les flux de matières et d'énergie attendus.

Les résultats sont visualisés sur la figure 23.

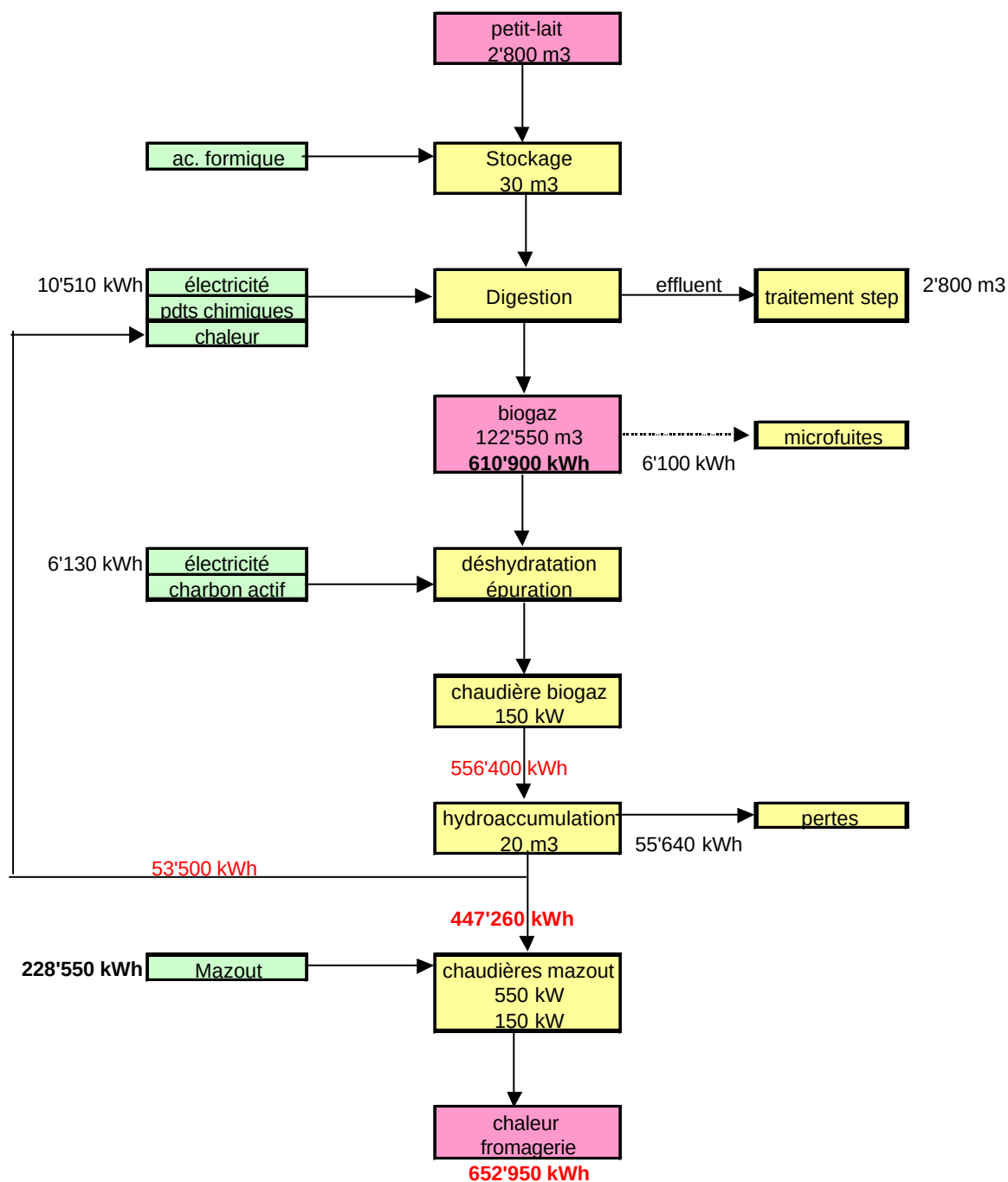


Figure 23 : Flux de matières et d'énergie de l'installation retenue sur une base annuelle

C.5 FAISABILITE ECONOMIQUE DE L'INSTALLATION DE BIOGAZ

C.5.1 Procédure

Un cahier des charges succinct, rédigé sur la base des résultats expérimentaux validés dans la première étape, a été transmis à sept fournisseurs d'installations de traitement d'effluents par méthanisation. La valorisation du biogaz, le post-traitement des boues avant rejet en step ainsi que le génie civil sont exclus de la présente consultation.

Quatre fournisseurs nous ont répondu :

	Degrémont SA 2 Rte André-Piller Givisiez CH-1762	VOR Environnement 6 Rte de St-Loup St Geniès Bellevue FR-31180	ADI Systems Inc 1133 Regent Street Fredericton NB E3B 3Z2 Canada	Proserpol BP27 St Quentin en Y. FR- 78184
Type procédé	CSTR ¹	UASB ²	CSTR	Lit fixé
Volume tot réacteur	144 m ³	180 m ³	700 m ³	110 m ³
Prix tot HT	750'000 CHF	525'640 CHF	517'500 CHF	485'250 CHF

Après examen attentif des offres, nous avons retenu celle qui répondait le mieux au cahier des charges, à savoir celle de la société Proserpol. C'est donc sur cette base qu'est réalisée la simulation économique.

Une consultation séparée a été réalisée pour la valorisation du biogaz et le génie civil. Le post-traitement de l'effluent et des boues est considéré être réalisé à la station d'épuration communale, du fait des faibles quantités en jeu. Une taxe de traitement sera incluse dans les frais d'exploitation.

C.5.2 Description technique de l'installation

Schématiquement, l'installation est composée des unités suivantes :

- un stockage du petit-lait de 30 m³ en PEHD³ calorifugé, avec mesure de niveau, pompe de soutirage et mesure de débit
- un bio-réacteur de méthanisation à lit fixé à flux descendant de 110 m³ total en SVR⁴, calorifugé, avec 1 groupe électropompe de recirculation et une mesure de débit, une mesure de niveau, une mesure de pression
- un échangeur de chaleur pour le réchauffage de l'influent avec boucle de régulation de la température
- un compresseur à biogaz pour le détassage, débit 200-900 m³/h

¹ CSTR : Continuously Stirred Tank Reactor

² UASB : Upflow Anaerobic Sludge Blanket

³ PEHD : Polyéthylène Haute Densité

⁴ SVR : Stratifié Verre Résine

- un dispositif d'addition de base ou sels tampon, avec pompe doseuse et mesure de pH
- un dispositif d'addition de solution d'éléments traces métalliques
- un dispositif d'addition d'anti-mousse
- une ligne biogaz avec casse vide / soupape hydraulique, mesure de débit, contrôle de pression, échangeur tubulaire pour le séchage, filtre à charbon et surpresseur

A noter que l'installation de méthanisation est prévue à l'extérieur.

La valorisation de biogaz a été chiffrée par la société Von Auw (1028-Préverenges). Elle comprend :

- une chaudière à biogaz de 120 kW
- deux ballons d'hydroaccumulation de 10 m³ chacun
- les systèmes de régulation, conduites, raccordement, isolation, électricité, transport et montage.

C.5.3 Evaluation des coûts

Frais financiers

Le montant global de l'investissement est détaillé dans le tableau 13. Il est globalement de 676'150 CHF HT. Les frais financiers sont calculée sur la base d'un amortissement de l'installation sur 15 ans avec un taux à 4%. Ils s'élèvent à 60'730 CHF, soit 21.7 CHF/m³ de petit-lait.

Postes	Montant en CHF HT
Stockage petit-lait	35'850
Méthanisation	157'200
Réchauffage influent	9'900
Stockage et dosage réactifs	16'500
Mesures et contrôle	15'450
Electricité	73'350
Tuyauterie	60'600
Transport et montage	19'800
Ingénierie	79'950
Charpentes, caillebotis	16'650
Génie civil	29'900
Sous-total « production de biogaz »	515'150
Valorisation biogaz	161'000
Total « production et valorisation du biogaz »	676'150

Tableau 13 : Détail du montant des investissements par grands postes

Frais d'exploitation

L'installation de méthanisation est située sur le terrain de la fromagerie. Une grande partie des tâches et du contrôle est automatisée. Les interventions de surveillance et d'entretien

sont estimées à 160 heures par an, soit en moyenne un peu plus d'1/2 heure par jour ouvrable. Elles sont effectuées par le personnel de la fromagerie. Le calcul est fait sur la base de 50 Fr/h. La maintenance est estimée comme un pourcentage du montant des équipements (hors ingénierie, transport et montage) : on retient ici 2%. Le coût des réactifs est calculé sur la base d'un fonctionnement industriel optimisé. Il inclut l'acide, la soude, l'antimousse, les métaux-traces, le charbon actif.

Les frais d'exploitation sont reportées dans le tableau 14.

Postes	Montant en CHF HT/an
Main d'œuvre	8'000
Maintenance	10'700
Réactifs	10'300
Electricité	2'500
Rejet effluent	4'200
TOTAL	35'700
Montant / m ³ petit-lait	12.8

Tableau 14 : Détail du montant des frais d'exploitation

Substitution de mazout

D'après l'analyse énergétique de la fromagerie et le mode de valorisation du biogaz retenue (voir paragraphe C.4.3), la quantité de mazout substituée se monte à 44'650 litres. Sur la base de 56 ct HT/litre (indice prix novembre 2004) cela représente une économie de 25'000 CHF HT par an.

Coût du traitement de petit-lait par méthanisation

Les paramètres de coût sont résumés dans le tableau 15.

Le coût global du traitement de petit-lait par méthanisation, avec valorisation thermique du biogaz, s'établit donc à 25.6 CHF par m³, soit un surcoût de 8 CHF/m³ par rapport au coût actuel pour la fromagerie de référence.

	Coût en CHF HT/m ³ petit-lait
Frais d'investissement	21.7
Frais d'exploitation	12.8
Sous-total	34.5
Substitution mazout	- 8.9
TOTAL	25.6
Coût de la prise en charge pour l'affouragement	- 18
Surcoût de méthanisation	7.6

Tableau 15 : Détail du coût de traitement du petit-lait par méthanisation

C.6 CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

La production de biogaz, bien que développée dans d'autres industries agroalimentaires, n'est pas à ce jour appliquée industriellement à la valorisation de petit-lait pur. Pourtant les perspectives en sont prometteuses, et les fromageries sont de gros consommateurs d'énergie : cette première partie de l'étude était destinée à valider un concept de traitement sur le site d'une fromagerie.

L'étude expérimentale a été réalisée sur un méthaniseur pilote adapté à ce type substrat, utilisant la technologie du lit fixé à flux descendant. Elle a permis de démontrer la faisabilité du traitement et d'en définir les performances ainsi que les paramètres de fonctionnement. Le petit-lait utilisé avait une teneur moyenne en DCO de 70 g/l. Des rendements de dégradation de plus de 90% de la DCO, et des productivités en méthane correspondant à 95% du maximum théorique ont été obtenus, soit dans notre cas une production de 22 m³ de méthane par m³ de petit-lait. Une complémentation avec une solution minérale a été nécessaire pour stabiliser la digestion : dans ces conditions des charges de 20 kg DCO/m³ réacteur. jour ont été appliquées, sans atteindre la limite du déséquilibre.

L'analyse des consommations énergétiques de la fromagerie a montré que la valorisation optimale du biogaz était la valorisation thermique. La consommation d'énergie thermique est bien corrélée à la production de fromage et donc de petit-lait. Ceci permet une valorisation optimale sur une base annuelle. Cependant la consommation énergétique étant maximale pendant les heures de fabrication (environ 8 heures par jour), et la production de biogaz étant continue sur 24 heures, un stockage intermédiaire de l'énergie doit être prévu. L'hydro-accumulation présente les spécificités les mieux adaptées au concept développé. Ainsi, dans le cas de la fromagerie étudiée, la production de biogaz permet de substituer 68% du mazout consommé annuellement.

Concernant une possible valorisation du petit-lait digéré en alimentation animale, les résultats sont négatifs. Du fait de la très bonne biodégradabilité du petit-lait il ne reste que très peu d'éléments nutritifs après la digestion. De plus l'odeur du produit, due essentiellement à la présence d'acides résiduels et de produits soufrés, est rédhibitoire.

L'étude économique, réalisée sur la base des résultats obtenus, a montré que le coût total de la production et de la valorisation du biogaz à partir de petit-lait se monte à 26 CHF environ par m³ de petit-lait. Cette solution pourrait donc rapidement s'avérer économiquement intéressante dans le cas, de plus en plus fréquent, où la fromagerie doit payer pour la prise en charge du petit-lait des montants qui atteignent actuellement déjà 15 à 20 CHF/m³.

Globalement le surcoût généré par la production et la valorisation de biogaz se monte donc actuellement à 8 CHF/m³ de petit-lait⁵. La rentabilité de l'opération sera réalisée lorsque le coût de prise en charge du petit-lait atteindra 26 CHF/m³.

⁵ Sur la base d'un coût de 1.8 ct/litre pour la prise en charge du petit-lait vers l'affouragement porcin.

D. DEUXIEME PARTIE : COMPARAISON DES FILIERES BIOGAZ ET BIO-ETHANOL

D.1 INTRODUCTION

La production de biogaz et de bio-éthanol sont deux filières biologiques permettant de valoriser le potentiel énergétique du petit-lait .

Concernant la filière biogaz, on a choisi pour le présent projet de développer un concept pour le traitement et la valorisation énergétique du petit-lait à l'échelle d'une fromagerie de taille moyenne. Dans le cadre de l'utilisation du biogaz sur le site de la fromagerie, l'analyse des besoins énergétiques a montré que la valorisation thermique est la mieux adaptée.

La production de bio-éthanol s'inscrit quant à elle dans le cadre d'une production industrielle de carburant dans une installation centralisée.

Aussi la comparaison des deux filières est rendue difficile par la différence d'échelle et par la différence de nature de l'énergie renouvelable produite.

Afin de trouver néanmoins un moyen de comparaison pertinent et compatible avec les principes de l'ACV, on a choisi de réaliser les comparaisons suivantes :

- production et utilisation du biogaz versus production et utilisation du mazout dans une chaudière
- production et utilisation du bio-éthanol dans l'essence⁵ versus la production et l'utilisation d'essence classique dans un véhicule
- comparaison finale entre les impacts environnementaux de la substitution de l'essence par le bio-éthanol et ceux de la substitution du mazout par le biogaz

D.2 DESCRIPTION TECHNICO-ECONOMIQUE DE LA FILIERE BIO-ETHANOL

Cette partie a été rédigée sur la base des informations transmises par notre partenaire dans le projet AlcoSuisse et son mandataire le LASEN/EPFL.

La filière envisagée ici comprend les étapes suivantes :

- la concentration du petit-lait avant son transport jusqu'à l'usine ;
- le transport du petit-lait concentré jusqu'à l'usine de production de bio-éthanol ;
- la production du bio-éthanol et des co-produits ;

A partir des différentes étapes énumérées ci-dessus, la description de la chaîne de production de bio-éthanol issu du petit-lait est ici divisée en deux grandes phases, à savoir, la production et l'acheminement du petit-lait concentré jusqu'à l'usine de bio-éthanol et la production de l'éthanol proprement dite.

D.2.1 Concentration et acheminement du petit-lait concentré

Concentration du petit-lait

La faible teneur en matière sèche du petit-lait (environ 6%) impose, avant le transport jusqu'à l'usine de bio-éthanol, une étape préalable de concentration de la matière sèche, afin d'éviter, d'une part, des coûts de transport trop élevés et, d'autre part, des rendements de fermentation trop faibles et des coûts de recouvrement trop élevés. La technologie qui a été retenue dans le cadre de cette étude consiste en une étape d'ultrafiltration suivie d'une étape de nanofiltration, permettant ainsi d'aboutir à une teneur en matière sèche de l'ordre de 22%.

L'ultrafiltration sépare le petit-lait en deux composantes (voir bilan figure 24) : le retentat (ou concentrat) UF et le perméat UF. Cette étape visant essentiellement à retenir les protéines, la composition du perméat UF ne diffère que très légèrement de celle du petit-lait en termes de teneur en matières sèches et/ou en lactose.

Appliquée au perméat UF, la nanofiltration (NF) permet d'atteindre une très grande sélectivité vis-à-vis du lactose, de l'ordre de 98.5% (voir bilan figure 24). Dans le cas envisagé ici, le facteur de concentration est de l'ordre de 4, permettant ainsi l'obtention d'un rétentat NF à 22% de matière sèche (MS).

Le perméat NF, quant à lui affiche une teneur en matières sèches inférieure à 0.5%. Cet effluent peut ainsi être traité de manière tout à fait conventionnelle en station d'épuration, voire même, le cas échéant, utilisé comme eau industrielle.

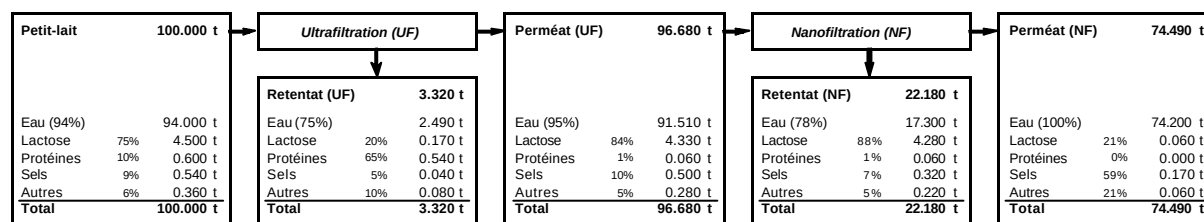


Figure 24 : Bilan de masse de la phase de concentration du petit-lait

A l'issue des deux étapes de séparation membranaire (UF, NF), le petit-lait concentré à 22% MS possède une température d'environ 50°C (soit environ la température du petit-lait à la sortie de la fromagerie). Pour des raisons de conservation, celui-ci est dans un premier temps stocké dans des cuves et conservé à une température de l'ordre de 5°C.

La figure 25 propose un diagramme des flux de masse et d'énergie de l'installation de concentration du petit-lait. L'unité de concentration repose essentiellement sur les données de différentes publications (13, 14, 15) et possède une capacité de traitement de petit-lait de 52'130 t/an de petit-lait brut, soit une capacité de production de 11'560 t de petit-lait concentré à 22%MS.

Transport du petit-lait concentré

Le détail de l'étape de transport du petit-lait concentré à 22% depuis le site de nanofiltration jusqu'à l'usine d'éthanol résulte d'une offre de Translait à Alcosuisse en 2002. Le transport est effectué par poids lourds (EURO III, 34 tonnes), sur une distance moyenne de 120 km. Le petit-lait concentré étant chargé à une température de l'ordre de 5°C, aucune réfrigération des citernes n'est envisagée pour une telle distance de transport (selon indication orale de M. Hirschi, Aquaren, 2004).

Unité de référence

1 année

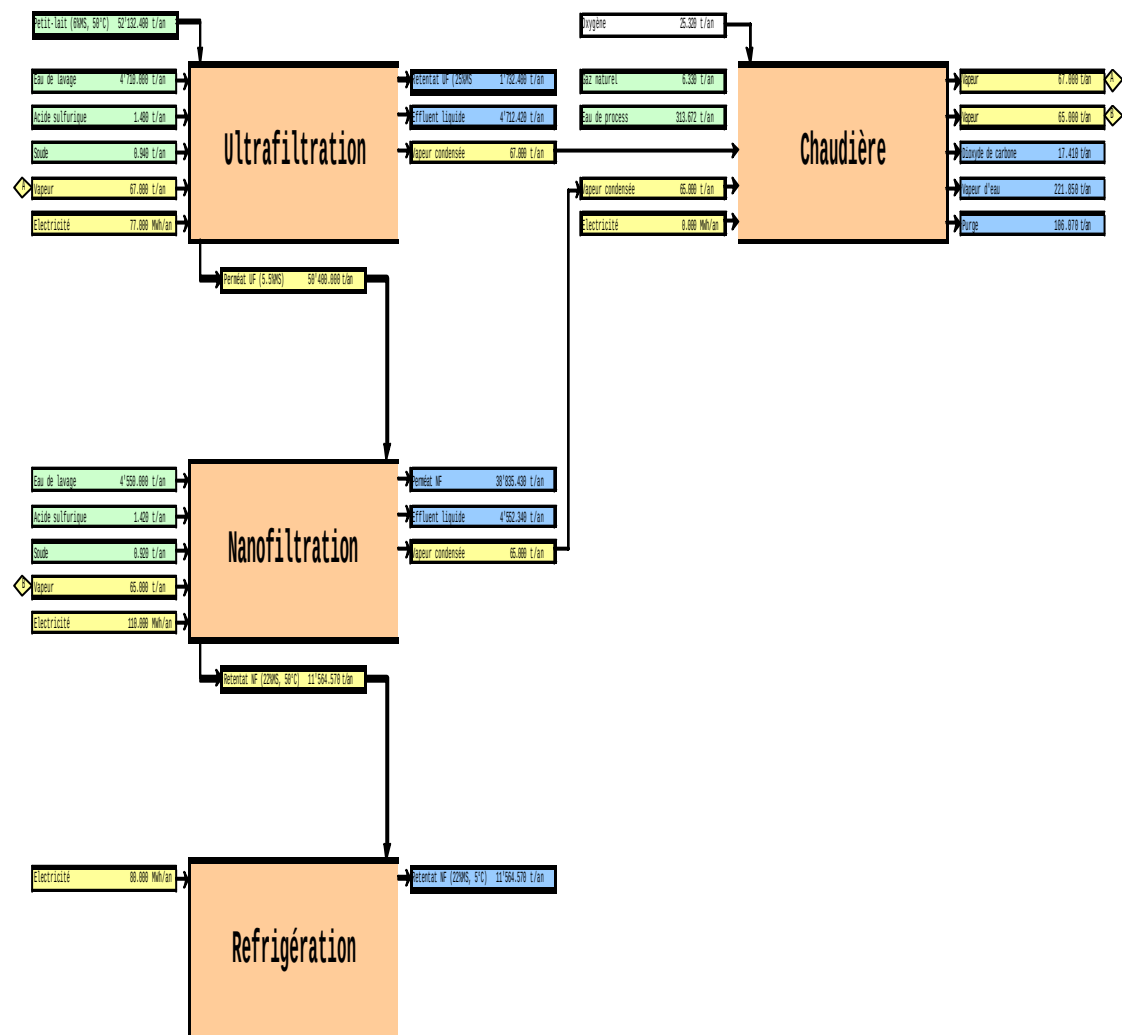


Figure 25 : Diagramme des flux annuels de l'installation de concentration de petit-lait

D.2.2 Production d'éthanol à partir de petit-lait concentré

La capacité de production envisagée est de 20'000 l/jour d'éthanol déshydraté à raison de 336 jours par an, soit **6'720'000 litres d'éthanol par an**. La capacité retenue et les données de référence relatives au petit-lait font suite à l'inventaire des ressources établi par Planair SA (16) auprès des fromageries et en particulier des entreprises Swiss Dairy Food et Cremo sur les caractéristiques et quantités disponibles.

Description technique du procédé

La description technique de l'installation et du procédé de conversion des différentes matières premières en éthanol est reprise et adaptée (selon la mise à jour des données), depuis l'étude préliminaire de Maguin Interis (17). Elle est détaillée en annexe 5.

La figure 26 offre une vue d'ensemble du diagramme de l'usine de production de bioéthanol à partir de petit-lait concentré et montre l'organisation globale de l'installation.

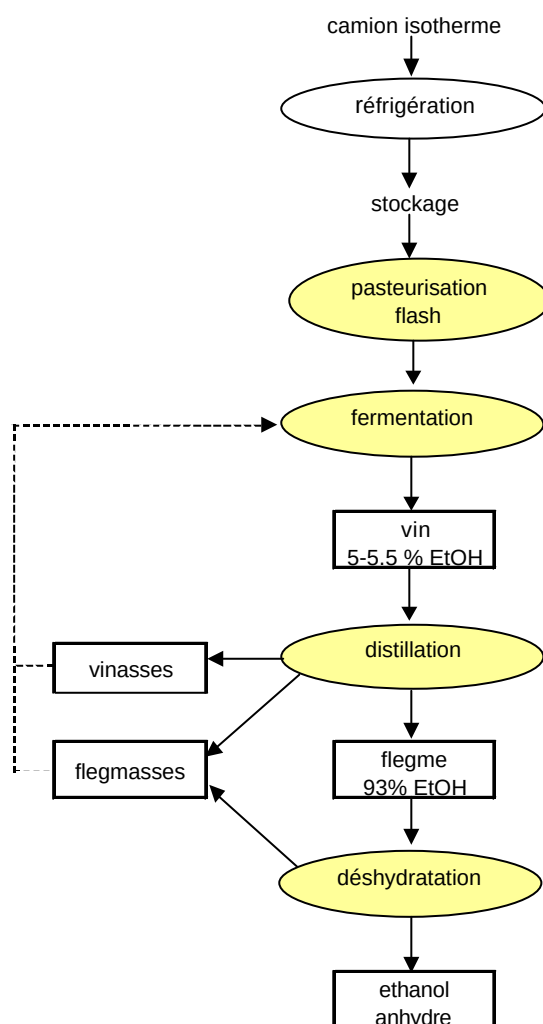


Figure 26 : Diagramme de l'usine de production de bioéthanol à partir de petit-lait

Les flux annuels de matières et d'énergie sont repris sur la figure 27.

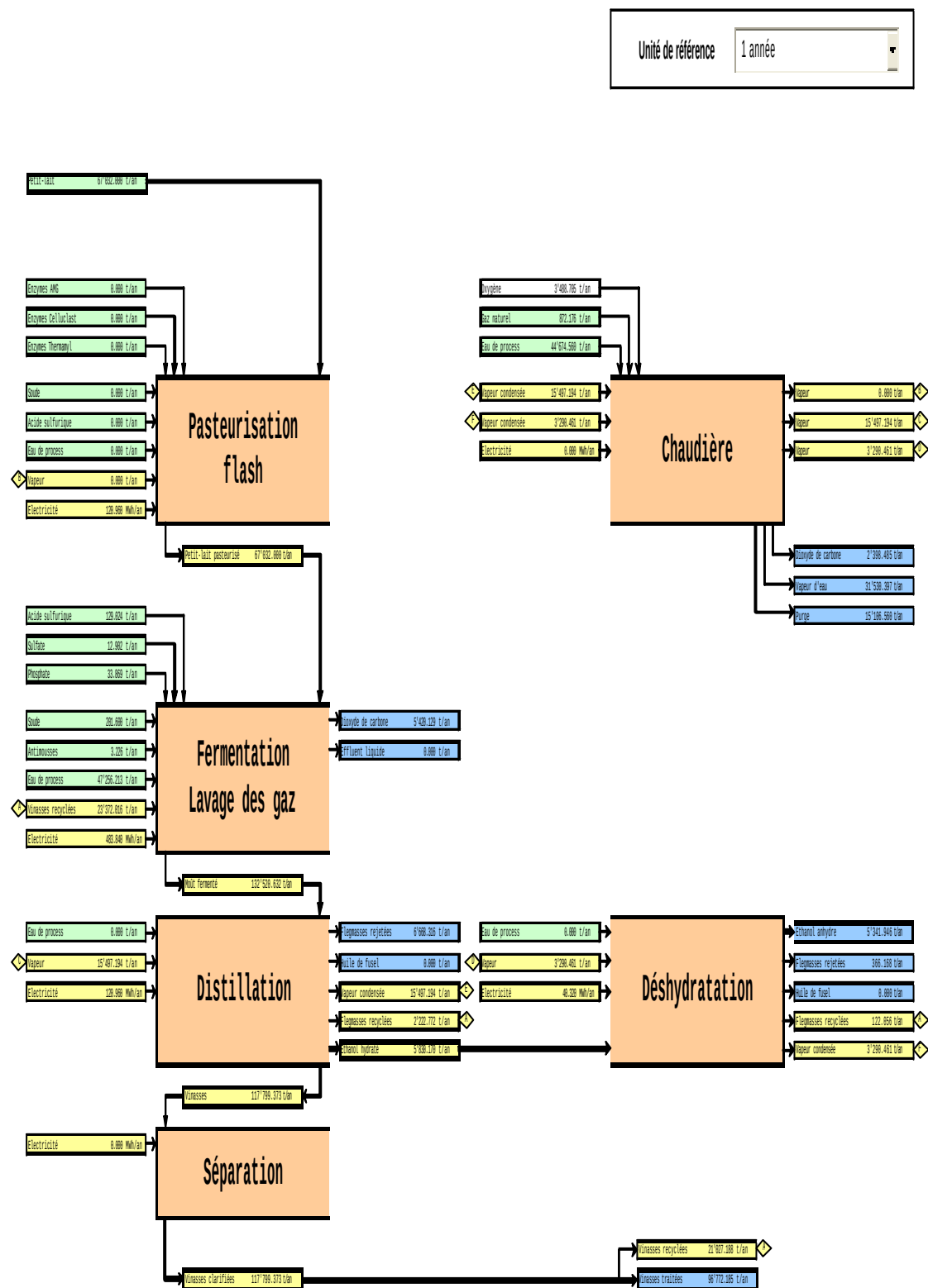


Figure 27 : Diagramme des flux de matières et d'énergie de la production d'éthanol sur une base annuelle

D.2.4 Analyse économique de la filière bio-éthanol

L'analyse économique est détaillée en annexe 6. Les chiffres ont été transmis par AlcoSuisse.

Production de petit-lait concentré

L'analyse économique de l'unité de concentration (y compris la réfrigération) est ici réalisée pour la même installation de référence introduite plus haut, d'une capacité de traitement de 52'130 t/an de petit-lait brut, soit une capacité de production de petit-lait concentré à 22% MS d'environ 11'560 t/an. L'approvisionnement de l'usine d'éthanol sera ainsi assuré au moins par **7 unités** de concentration d'une telle capacité. Les chiffres sont reportés dans le tableau 16.

Composantes de coûts	Dépenses annuelles CHF/an	Coût de production CHF/m ³ petit-lait concentré
Coûts d'investissement	187'340	16.20
Coûts d'exploitation variables	276'540	23.90
Coûts d'exploitation fixes	150'050	13.00
Recette (protéines)	-218'120	-18.90
Total	395'810	34.20

Tableau 16 : Détail des coûts de production de petit-lait concentré (D'après Rehberger et FAM 2003)

Transport

Le transport est effectué par poids lourds (EURO III, 34 tonnes), sur une distance moyenne de 120 km. Selon indications de M. Krummenacher (communication écrite, 10.2004), le coût du transport s'élève à 37CHF par tonne de charge utile (soit encore 0.308 CHF/t.km) et inclut la redevance poids lourds (RPLP) aux nouveaux tarifs annoncés pour 2005.

Production du bio-éthanol

Frais d'investissement

Les frais d'investissement concernent l'unité de production précédemment décrite, c'est à dire avec une capacité de production de 6'720'000 litres d'éthanol par an. Ils représentent un peu plus de 10 millions CHF et sont détaillés dans le tableau 17.

Etapes de traitement	Investissements spécifiques (CHF)
Pasteurisation flash	1'150'000
Fermentation	3'600'000
Distillation	2'940'000
Déshydratation	2'550'000
Total	10'240'000

Tableau 17 : Détail des investissements

Frais d'exploitation

Les coûts d'exploitation fixes comprennent les salaires, mais également les frais généraux, la maintenance, ainsi que tous les frais annuels liés aux assurances et aux taxes. La maintenance de l'usine est prise en compte selon un pourcentage (ici 2%) du coût total de l'équipement. Il en est de même pour les assurances et les taxes, avec 1.5%.

Les coûts d'exploitation variables comprennent les dépenses liées à l'approvisionnement en matières premières (petit-lait), en ressources (produits chimiques, eau, nutriments, enzymes, levures, etc.), en énergie (gaz, électricité), mais également les dépenses liées au traitement des effluents.

Les frais d'exploitation fixes et variables sont résumés dans le tableau 18.

Coûts fixes (CHF/an)	2'120'000
Coûts variables (CHF/an)	
petit-lait concentré	5'253'000
consommables	120'300
énergie	563'700
traitement effluents	33'300
Total frais d'exploitation (CHF/an)	8'090'300

Tableau 18 : Frais d'exploitation

Coût de production du bioéthanol

Les coûts sont synthétisés dans le tableau 19. Le coût résultant de production du bioéthanol s'élève à 1.34 CHF/litre, ce qui correspond à un coût de traitement du petit-lait brut de 27.1 CHF/m³.

Concentration et transport du petit-lait	CHF par m ³ petit-lait concentré produit	CHF par m ³ petit-lait brut initial
Coûts annuels d'investissement	16.2	3.59
Coûts d'exploitation	36.9	8.18
Recettes UF (protéines)	-18.9	-4.18
Total concentration	34.2	7.57
Transport	37	
Concentration et transport	71.2	15.8
Production du bio-éthanol	CHF par lit bio-éthanol	CHF par m ³ petit-lait brut initial
Coûts annuels d'investissement	0.137	2.76
Coûts d'exploitation	0.422	8.53
Production éthanol	0.56	11.3
COUT TOTAL	1.34	27.1

Tableau 19 : Coût de production du bio-éthanol

D.3 ANALYSE DE CYCLES DE VIE : DEFINITIONS ET METHODE

D.3.1 Principe et définitions

L'analyse de cycle de vie ou ACV est un instrument comparatif, permettant d'évaluer la charge environnementale de plusieurs produits, procédés ou systèmes. Elle a été réalisée selon la structure et les directives de la norme ISO 14040, qui précise de manière très détaillée la méthodologie la mieux indiquée à l'heure actuelle, pour la réalisation d'une telle analyse.

Le code de pratique décrit dans la série de normes internationales ISO 14040-43 (18) définit, selon la méthodologie conventionnelle de l'évaluation d'impact environnemental de type "analyse de cycle de vie" ou "écobilan", les quatre étapes suivantes :

- la définition des objectifs, du système et de ses limites
- l'inventaire des émissions et de la consommation des ressources
- l'évaluation de l'impact environnemental
- l'interprétation des résultats

La **définition des objectifs, du système et de ses limites** permet de poser le problème, de définir les objectifs et la portée de l'étude. La détermination de la fonction du système, de l'unité fonctionnelle⁶ à laquelle les émissions seront ensuite rapportées ainsi que la définition des limites du système étudié jouent un rôle crucial. C'est aussi dans cette étape que les scénarios de base et les variantes à étudier sont définis en détail.

L'**inventaire des ressources et des émissions** quantifie l'utilisation des matières premières ainsi que les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol, à travers une description détaillée du procédé étudié.

L'**évaluation de l'impact environnemental** vise à évaluer l'impact sur l'environnement des émissions inventoriées dans l'étape précédente en agrégeant les émissions et en les pondérant selon leur potentiel à causer une perturbation environnementale.

Le cadre scientifique ainsi que la méthodologie liée à l'évaluation de l'impact sont encore à l'heure actuelle en cours de développement. Il n'existe pas encore, en effet, de méthodologie universelle et acceptée de tous, permettant d'associer, d'une manière qui soit à la fois cohérente et précise, les données de l'inventaire à un éventuel impact environnemental. De plus, il existe toujours une part de subjectivité dans le choix, la modélisation et l'évaluation des catégories d'impact.

Ainsi, il est essentiel de maintenir la plus grande transparence lors de l'évaluation de l'impact selon l'approche ACV, afin de s'assurer que les hypothèses sont décrites et définies de la manière la plus claire possible.

Enfin, l'**interprétation des résultats** obtenus à chacune des étapes précédentes, repose sur une analyse critique de l'influence du choix des limites ainsi que sur une analyse de sensibilité des hypothèses. Cette interprétation peut prendre la forme de conclusions et de recommandations auprès des décideurs.

⁶ L'unité fonctionnelle est une mesure de la performance des outputs fonctionnels du système. L'unité fonctionnelle constitue une référence à laquelle sont associés les inputs et outputs relatifs au système. Une référence unique est indispensable afin de permettre la comparaison des différents scénarios dans le cas d'une étude comparative.

D.3.2 Système, unité fonctionnelle et méthode d'analyse

De manière très générale, les **limites du système** sont définies de la manière indiquée sur la figure 28 (19) et incluent toutes les étapes du processus de fabrication jusqu'à l'obtention du produit fini, y compris la production et la mise à disposition des divers intrants (ou inputs).

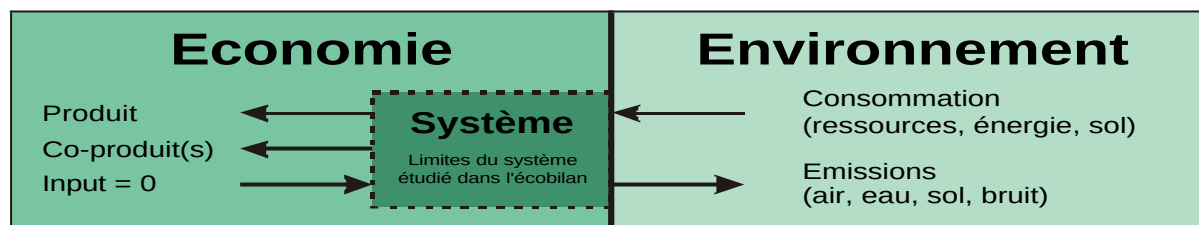


Figure 28 : Rapports et échanges entre le système, l'environnement et l'économie (source :18)

Dans le cas de la filière bioéthanol, le **système** considéré, pour chacun des carburants envisagés, englobe toute l'infrastructure de production et de mise à disposition du carburant, depuis l'extraction dans l'environnement des ressources primaires jusqu'à la distribution du carburant auprès du consommateur, ainsi que l'utilisation du carburant dans le véhicule de référence (Figure 29)

Dans le cas de la filière biogaz, le système considéré pour chacun des combustibles englobe l'infrastructure de production et de distribution du combustible (fioul ou biogaz), ainsi que l'utilisation du combustible dans une chaudière de référence (Figure 30).

La **fonction principale du système** est, pour chacune des filières envisagées, la valorisation énergétique du petit-lait.

L'**unité fonctionnelle** principale en référence à laquelle seront exprimés les résultats, est ici un m³ de petit-lait valorisé.

Pour la comparaison intra-filière [biogaz/mazout] et [bioéthanol/essence], on considèrera à chaque fois la production d'une quantité d'énergie utile équivalente à celle produite par la transformation de un m³ de petit-lait.

On obtiendra ainsi par exemple une quantité de gaz à effet de serre émis :

- par la substitution du mazout par du biogaz issu de la transformation un m³ de petit-lait transformé.
- par la substitution de l'essence par du bio-éthanol issu de la transformation de un m³ de petit-lait

L'**allocation des ressources consommées et des émissions polluantes** est déterminée proportionnellement aux valeurs économiques respectives des divers produits (ou co-produits) issus du procédé de transformation de la biomasse.

La **méthode** d'analyse de cycle de vie adoptée dans le cadre de cette étude est la méthode "EcoIndicator'99", développée par le bureau néerlandais PRé Consultants (20), et désormais éprouvée, reconnue et largement utilisée dans le domaine de l'analyse de cycle de vie.

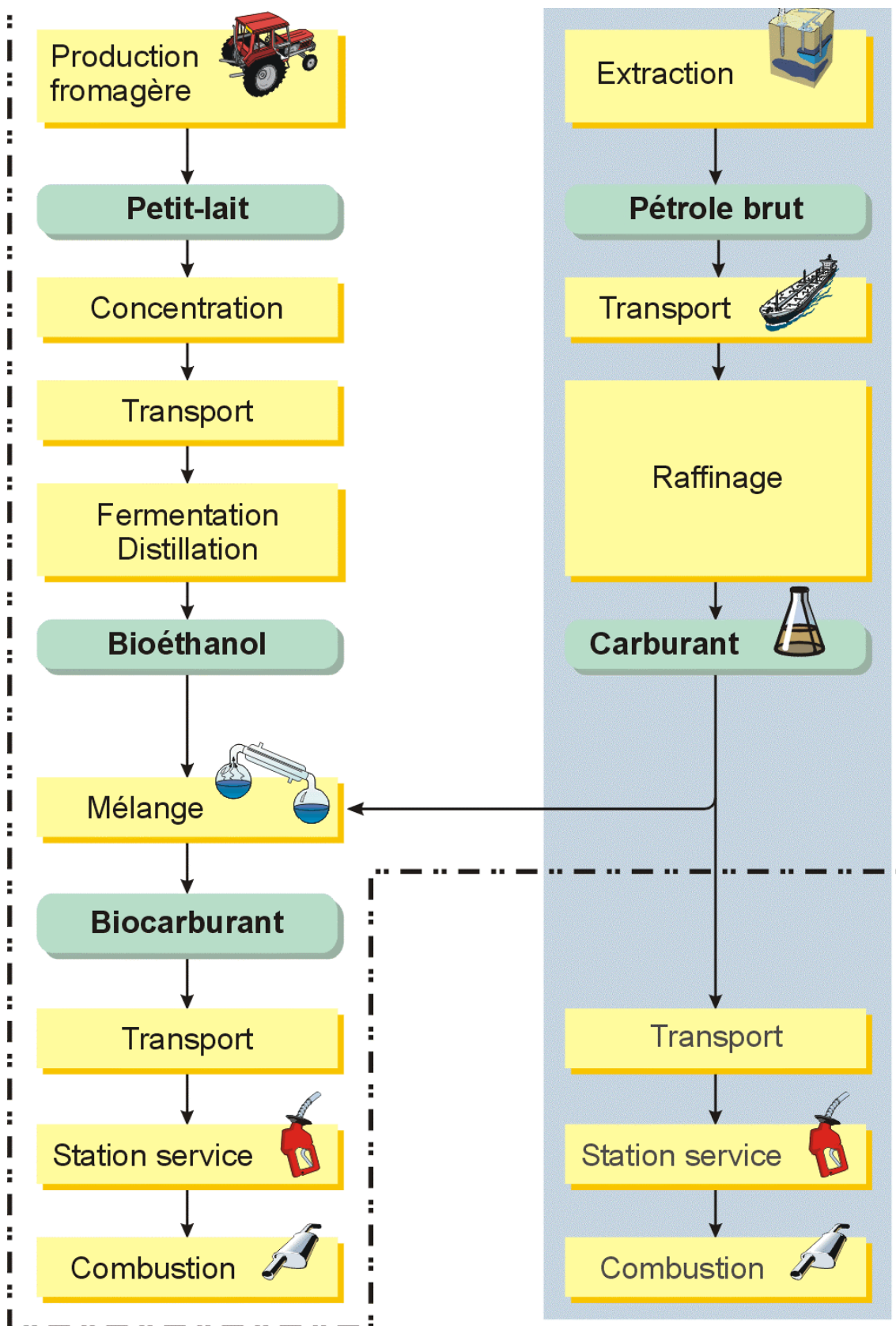
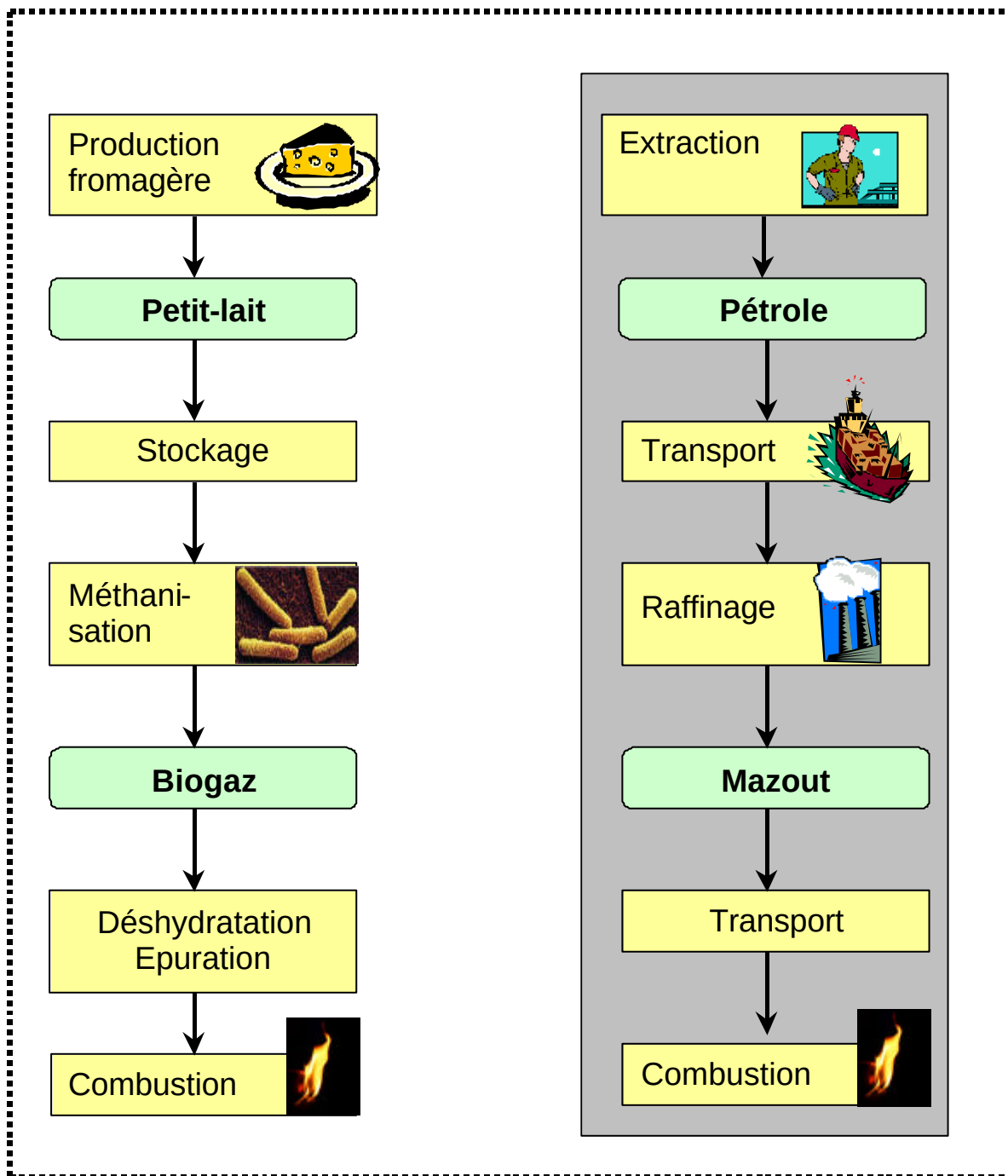


Figure 29 : Frontières et caractérisation des systèmes de la filière bio-éthanol



D.3.3 Caractérisation des critères d'impacts environnementaux considérés

La structure générale de la méthode "EcoIndicator'99" est présentée en filigrane sur la figure 31. A noter sur la figure, la mention des divers aspects "devenir" (*fate analysis*), "effet" (*effect analysis*) et "dommage" (*damage analysis*). Dans ses "Guidelines for Life-Cycle Assessment", la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) précise en effet que le calcul d'impact devrait tenir compte à la fois de l'aspect "devenir" (à savoir, les procédés de dégradation et de transport des polluants vers les autres compartiments environnementaux) et de l'aspect "effet" (toxicité) des polluants.

Les critères d'impacts environnementaux retenus dans le cadre de la présente étude, selon les recommandations de OFEN et en accord avec les partenaires du projet, ne concernent que deux des onze critères d'impacts environnementaux envisagés dans la méthode EcoIndicators'99, à savoir :

- la consommation d'énergie primaire non renouvelable
- l'effet de serre

Tous les critères n'ayant pas été considérés, la dernière agrégation permettant l'évaluation des "dommages" (*damage analysis*) n'est pas effectuée dans le cadre de cette étude. Les résultats de l'analyse de cycle de vie sont ainsi présentés sous la forme d'impacts-scores relatifs à chacun des critères cités ci-dessus. La portée de l'ACV réalisée dans cette étude est précisée sur la figure 31 en traits pleins.

Consommation d'énergie primaire non renouvelable

L'analyse de cycle de vie permet d'estimer la consommation d'énergie primaire associée à la production et la mise à disposition d'un combustible ou d'un carburant. La consommation d'énergie primaire (non renouvelable) est ici exprimée en **MJ_p consommés par m³ de petit-lait** pour chacune des deux filières.

Effet de serre

L'effet de serre est le nom du phénomène de rétention par l'atmosphère de la chaleur émise par la terre. L'augmentation des rejets de gaz à effet de serre fait craindre un bouleversement de l'équilibre climatique. L'impact est exprimé en **kg de CO₂ eq. émis par m³ de petit-lait**. Bien qu'un nombre considérable de polluants soient en fait pris en compte dans l'évaluation de l'impact, les principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O).

Le **dioxyde de carbone** est le principal gaz à effet de serre et sert de référence pour le calcul de l'impact. Les émissions sont en effet pondérées à l'aide de potentiels d'impact permettant d'exprimer toutes les émissions en kg de CO₂ équivalent (IPCC, 2001).

Le **méthane** contribue au phénomène d'effet de serre, et possède un coefficient d'équivalence vis-à-vis du CO₂ égal à 7⁷. La contribution principale aux émissions de méthane réside dans la synthèse des engrais azotés minéraux.

Le **protoxyde d'azote** est un gaz à effet de serre au même titre que le dioxyde de carbone et le méthane, mais il possède un coefficient d'équivalence vis-à-vis du CO₂ égal à 156⁸. Les activités agricoles peuvent être à l'origine d'émissions de N₂O. Ces émissions sont directement liées à la concentration en nitrates dans le sol. La production de N₂O provient essentiellement de la transformation des engrais azotés par des bactéries (dénitrification biologique).

⁷ Un coefficient d'équivalence de 7 (vis-à-vis du CO₂) signifie que l'émission de 1 kg de méthane équivaut celle de 7 kg de CO₂.

⁸ L'émission d'un kilogramme de protoxyde d'azote équivaut celle de 156 kg de dioxyde de carbone.

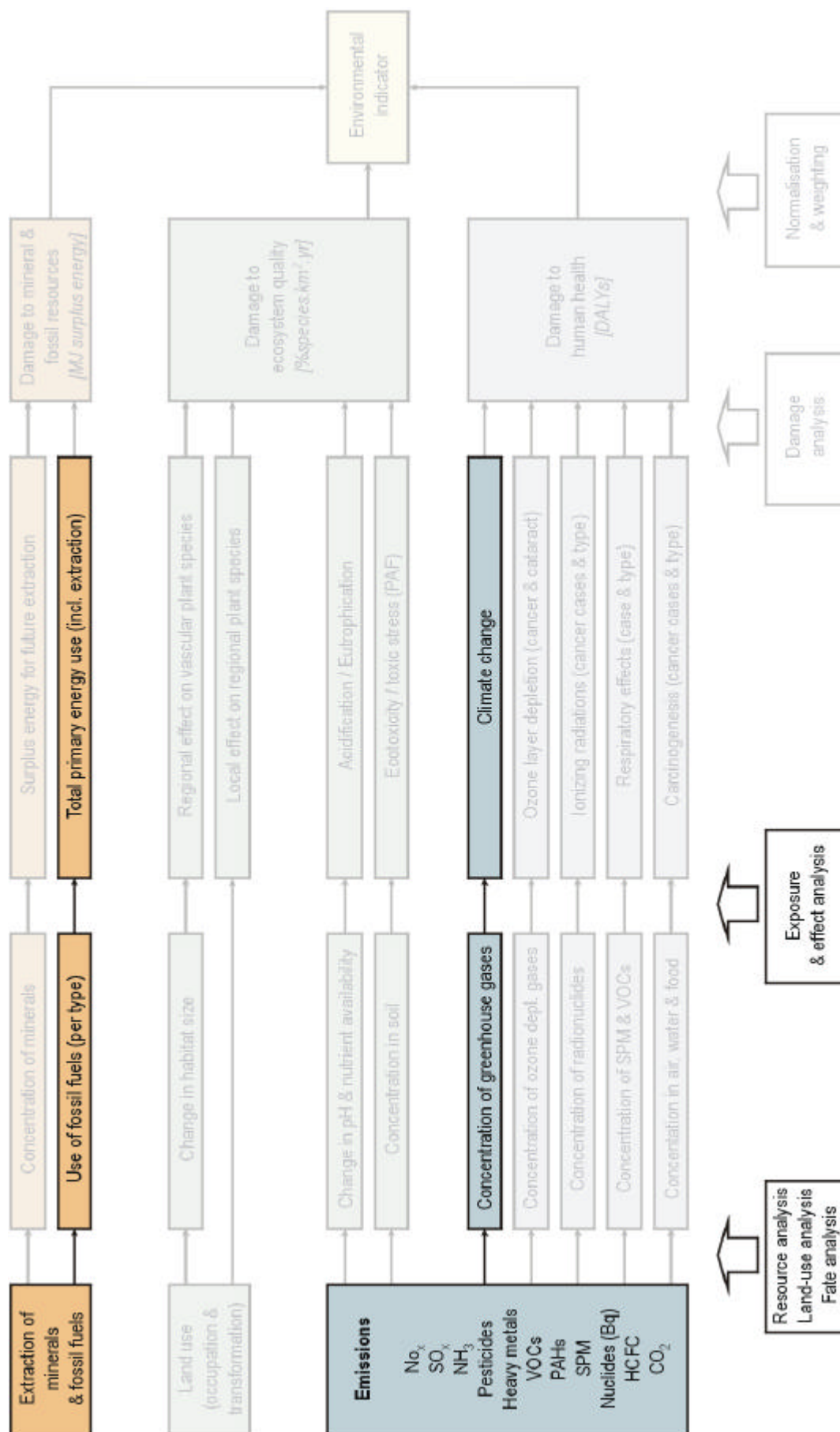


Figure 31 : Schéma de principe de la méthode ACV selon EcoIndicator 1999 (en filigrane) et retenue dans le cadre de l'étude (en plein)

D.3.4 Hypothèses concernant l'analyse de cycle de vie

Le petit-lait en sortie de fromagerie est ici considéré comme un déchet, de valeur marchande nulle. Il ne lui est de ce fait attribué aucune charge environnementale en relation avec les activités amont (élevage, production de lait, production de fromage).

Les matières premières issues de la biomasse bénéficient d'un crédit de CO₂ lié au processus de photosynthèse. La prise en compte de crédit dans le calcul d'impact impose également la prise en compte de la totalité des émissions de CO₂ d'origine biogénique intervenant tout au long de la chaîne de production et d'utilisation. Le petit lait étant issu de la biomasse un crédit de CO₂ est pris en compte, en proportion directe avec la teneur en carbone du petit-lait. Ainsi, la teneur massique en carbone du petit-lait étant de l'ordre de 40 - 45% de la matière sèche (MS), et la teneur en MS d'environ 6 - 6.5% (soit environ 27g de carbone par kg de petit-lait), le crédit de CO₂ est égal à 100 g par kg de petit-lait.

Les sources des données relatives à l'ACV, ainsi que la façon dont les différents intrants modélisés à travers l'analyse de cycle de vie réalisée ici sont décrites en annexe 8.

D.3.5 Limites de l'analyse de cycle de vie

L'approche envisagée dans la présente étude, concernant la caractérisation environnementale des procédés de production de bioéthanol ou de biogaz, se limite au point de vue du producteur d'énergie renouvelable. On ne tient effectivement pas compte de l'effet induit par l'utilisation, pour la production d'éthanol, du petit-lait, généralement utilisé à d'autres fins. Dans une optique plus globale de politique publique, la question de l'allocation d'une matière première "rare" entre différents usages est très pertinente ; mais il conviendrait alors de conduire une telle analyse à une échelle beaucoup plus large, celle du développement des filières « énergie renouvelable à partir de biomasse » en Suisse.

Il est essentiel, enfin, de noter que les résultats présentés dans ce chapitre, et de manière plus générale dans cette étude, ne sont valables que dans les conditions envisagées ici et ne peuvent pas être généralisés à des systèmes de production différents. En particulier, les résultats de l'analyse comparative présentés dans ce chapitre ne sont valables que pour le taux d'incorporation d'éthanol envisagés, soit 5% dans l'essence sans plomb.

D.3.6 Calcul d'allocation

La méthode d'allocation appliquée pour l'analyse de cycle de vie est une allocation selon la valeur économique des co-produits. Cette méthode est apparue comme la mieux adaptée à notre cas, et s'avère applicable quelles que soient les circonstances. Elle part du principe que les produits sont fabriqués pour leur valeur marchande et c'est le caractère incitatif du revenu financier qui est pris en compte pour la répartition des charges environnementales.

- pour la filière biogaz il n'y a pas de sous-produits avec une valeur économique : on considère que l'ensemble des processus est imputable à la seule production de biogaz. Les facteurs d'allocation sont donc de 100% pour chacune des étapes
- pour la filière bio-éthanol, le calcul d'allocation est présenté en annexe 6. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 20.

Dans les deux cas les effluents liquides sont considérés comme un rejet et leur impact environnemental et financier est attribué au bio-combustible ou au bio-carburant.

Etapes de traitement	Coût par étape (kCHF/an)	facteurs d'allocation (%)
Concentration du petit-lait		
ultrafiltration (protéines)	1'390	21.5
nanofiltration	1'740	100
réfrigération	740	100
Transport	2'730	100
Production d'éthanol	3'760	100

Tableau 20 : Détail des coûts par étape et facteurs d'allocation

D.4 RESULTATS DES ACV

Afin d'avoir un élément de comparaison cohérent entre les deux filières, on rappelle que chacune des filières sera caractérisée par sa fonction spécifique, à savoir :

- fournir de l'énergie thermique par combustion dans une chaudière pour la filière biogaz dans le cadre du projet étudié
- fournir de l'énergie au moteur d'un véhicule pour en assurer le déplacement pour la filière bioéthanol

Pour ce faire, chacune des filières sera comparée à sa filière de référence, c'est à dire :

- la production et l'utilisation de mazout (ou de gaz naturel) comme combustible pour le biogaz
- la production et l'utilisation d'essence comme carburant pour le bioéthanol. A noter que dans ce cas la comparaison sera effectuée entre essence et essEnce 5 (mélange contenant 95% d'essence et 5% de bio-éthanol).

Les résultats finaux seront exprimés comme les impacts de la substitution de la filière « énergie renouvelable » à sa filière de référence, et ce pour une quantité d'énergie correspondant à la transformation et à l'utilisation **d'un mètre cube de petit-lait**.

D.4.1 Présentation des résultats de la filière biogaz

Evaluation des impacts de la production et de la valorisation du biogaz

Les résultats présentés sur la figure 32 concernent la consommation d'énergie primaire non renouvelable pour les étapes de production de biogaz (par grands postes) et de valorisation de biogaz. Ils sont exprimés en **MJ_{eq} par m³ de petit-lait**. On remarque que le poste correspondant aux infrastructures (digestion et stockages) est le plus élevé. Les produits chimiques utilisés (y compris leurs transports) ne sont pas non plus négligeables (acides, bases, anti-mousse..).

Les résultats de la Figure 33 concernent l'impact sur l'effet de serre. Ils sont exprimés en **kg CO₂ eq par m³ de petit-lait**. La prise en compte du crédit de CO₂ pour le petit-lait en tant que biomasse. se traduit par un impact nul sur l'effet de serre, y compris la combustion du biogaz.

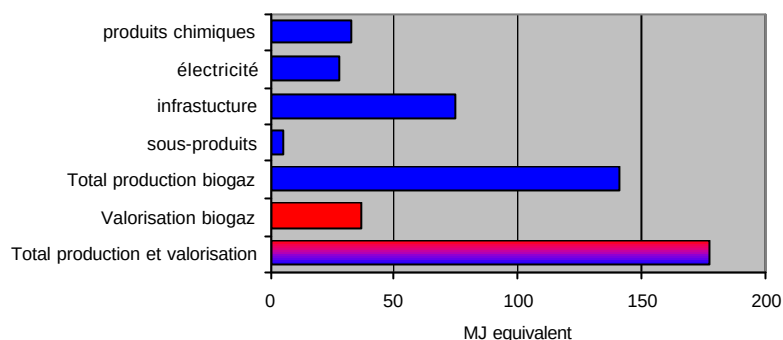


Figure 32 : Consommation d'énergie primaire non renouvelable de la filière biogaz

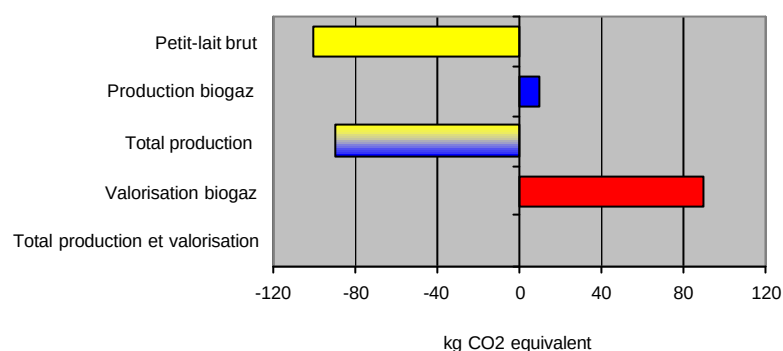


Figure 33 : Production de CO₂ pour la filière biogaz

Evaluation des impacts de la substitution de mazout par le biogaz

La figure 34 présente les résultats globaux de la production et l'utilisation du biogaz dans une chaudière biogaz, et la production et l'utilisation de fioul dans une chaudière fioul, de telle façon que la quantité de chaleur utile délivrée soit identique. Les résultats sont ramenés à 1 mètre cube de petit-lait brut, sortie fromagerie (35-50°C).

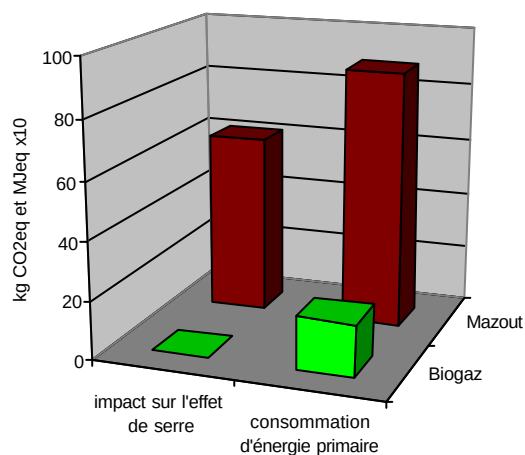


Figure 34 : Comparaison des impacts environnementaux entre le biogaz et le mazout utilisés comme combustible

La quantité d'énergie primaire économisée par l'utilisation du biogaz à la place du mazout est de 712 MJ pour un m³ de petit-lait. Quant à l'impact sur l'effet de serre il est quasi-nul avec le biogaz. La différence de production est de 62 kg CO₂ pour un m³ de petit-lait.

Les économies d'énergie primaire non renouvelable et d'émissions de CO₂ réalisées par mètre cube de petit-lait, pour la filière de valorisation en biogaz sont reportées dans le tableau 21.

Grandeur calculée	Critère d'impact	Résultat
$\Delta\text{Energie [MJ}_p/\text{m}^3_{\text{petit-lait}}]$	Consommation d'énergie primaire	– 712
$\Delta\text{CO}_2 [\text{kg CO}_2 \text{ eq.}/\text{m}^3_{\text{petit-lait}}]$	Effet de serre	– 62

Tableau 21 : Variation absolue des impacts environnementaux (mazout/biogaz) par mètre cube de petit-lait

Comparaison entre le mazout et le gaz naturel

Bien que la fromagerie considérée dans ce projet ne soit alimentée que par le mazout pour assurer ses besoins thermiques, il est apparu intéressant d'évaluer également l'impact de la substitution du biogaz par du gaz naturel. La variation absolue des impacts, par m³ de petit-lait est rapportée dans le tableau 22.

Grandeur calculée	Critère d'impact	Résultat
$\Delta\text{Energie [MJ}_p/\text{m}^3_{\text{petit-lait}}]$	Consommation d'énergie primaire	– 665
$\Delta\text{CO}_2 [\text{kg CO}_2 \text{ eq.}/\text{m}^3_{\text{petit-lait}}]$	Effet de serre	– 47

Tableau 22 : Variation absolue des impacts environnementaux (gaz naturel/biogaz) par mètre cube de petit-lait

La figure 35 présente la comparaison entre les substitutions du gaz naturel et du mazout sur la consommation d'énergie primaire et de l'impact sur l'effet de serre pour les deux combustibles et ramenés à un m³ de petit-lait. On constate que le gaz naturel a, sur ces paramètres, un impact plus faible que la mazout. Par conséquent la substitution du gaz naturel par le biogaz est un peu moins favorable, du point de vue environnemental, que la substitution de mazout.

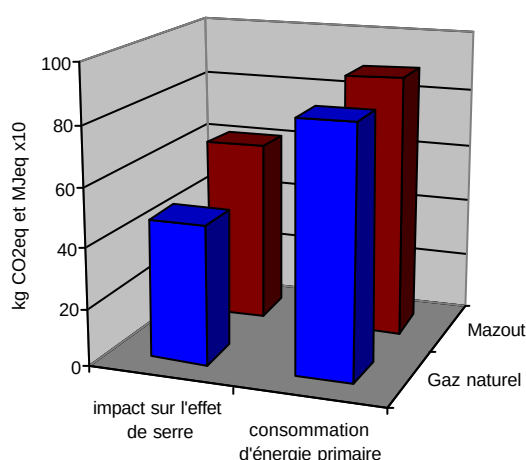


Figure 35 : Comparaison des impacts environnementaux entre le biogaz et le gaz naturel comme combustible

D.4.2 Présentation des résultats de la filière bio-éthanol

La logistique d'acheminement de l'éthanol jusqu'à la raffinerie et/ou aux centres de dépôt régionaux, la formulation et la distribution de l'essence₅, sont présentées en annexe 9.

Evaluation des impacts de la production de bioéthanol

Les résultats présentés sur la figure 36 concernent la consommation d'énergie primaire non renouvelable pour les étapes de préparation du petit-lait (concentration et transport) et de production de bioéthanol à partir de petit-lait concentré. Ils sont exprimés en **MJ_{eq} par m³ de petit-lait**. On observe que le poste le plus consommateur en énergie est la distillation. Concentration et transport sont également des postes gros consommateurs.

Les résultats de la Figure 37 concernent l'impact sur l'effet de serre. Ils sont exprimés en **kg CO₂ eq par m³ de petit-lait**.

A noter que l'on n'a pas tenu compte ici de la phase d'utilisation du carburant.

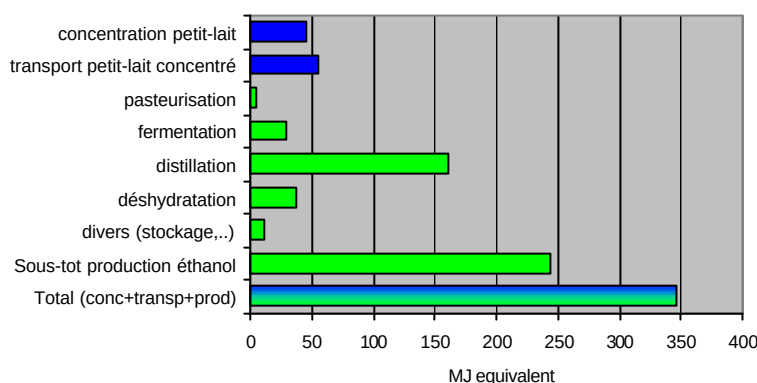


Figure 36 : Consommation d'énergie primaire non renouvelable de la filière éthanol

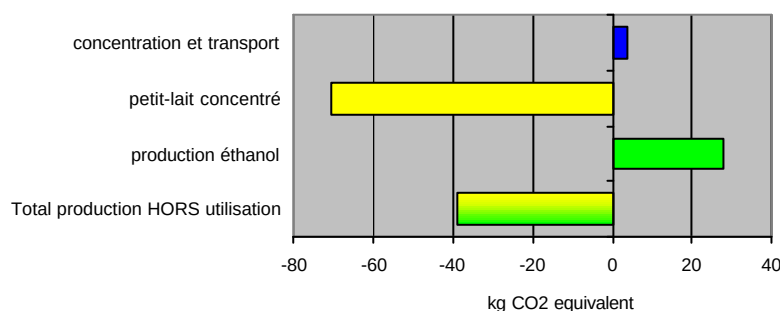


Figure 37 : Production de CO₂ équivalent pour la filière bioéthanol

Comparaison entre essence et essence₅, exprimée par litre de bioéthanol ajouté

Afin de mesurer de manière appréciable les bénéfices de l'incorporation de bioéthanol dans l'essence conventionnelle, la variation de l'impact environnemental entre les filières "essence" et "essence₅" peut être exprimée par litre d'éthanol introduit sur le marché des carburants automobiles (à prestation égale en termes de distance parcourue).

Connaissant, pour un véhicule donné, les impacts occasionnés avec et sans incorporation de bioéthanol, sur une distance de 100 km, la variation d'impact **par litre d'éthanol** est

obtenue en calculant la variation d'impact pour 100 km rapportée à la quantité d'éthanol consommée sur cette même distance.

Les résultats sont exprimés respectivement en litres de pétrole brut équivalents ($l_{\text{pétrole eq.}}$) et en $\text{kg CO}_2 \text{ eq.}$ économisés par litre d'éthanol incorporé dans l'essence, à prestation équivalente. Les résultats sont présentés dans le tableau 23.

Grandeur calculée	Critère d'impact	Résultat
$\Delta\text{Energie } [l_{\text{pétrole eq.}}/l_{\text{éthanol}}]$	Consommation d'énergie primaire	– 1.064
$\Delta\text{CO}_2 [\text{kg CO}_2 \text{ eq.}/l_{\text{éthanol}}]$	Effet de serre	– 3.168

Tableau 23 : Variation absolue des impacts environnementaux par litre d'éthanol incorporé

Comparaison entre essence et essEnce 5, ramenée à un m^3 de petit-lait

La présente étude est inscrite dans le cadre de la comparaison de deux filières de valorisation énergétique du petit-lait (à savoir, éthanol et biogaz). Afin de comparer sur de mêmes bases les performances environnementales et économiques respectives des deux filières, les résultats de la présente analyse de cycle de vie sont ici ramenés à 1 mètre cube de petit-lait brut, sortie fromagerie ($35\text{--}50^\circ\text{C}$). On exprime ainsi les économies d'énergie primaire non renouvelable et d'émissions de CO_2 réalisées par mètre cube de petit-lait, pour la filière de valorisation en éthanol-carburant. Les résultats sont reportés dans le tableau 24.

Grandeur calculée	Critère d'impact	Résultat
$\Delta\text{Energie } [\text{MJ}_p/\text{m}^3_{\text{petit-lait}}]$	Consommation d'énergie primaire	– 677
$\Delta\text{CO}_2 [\text{kg CO}_2 \text{ eq.}/\text{m}^3_{\text{petit-lait}}]$	Effet de serre	– 64

Tableau 24 : Variation absolue des impacts environnementaux par mètre cube de petit-lait

D.5 COMPARAISON DES FILIERES BIOGAZ ET BIOETHANOL

On rappelle préalablement que le concept développé ici pour la filière biogaz vise à produire et à valoriser ce biogaz sur le site même d'une fromagerie. Il se différencie par là d'autres concepts de traitement centralisé ou de co-digestion sur un site extérieur, et supprime tout transport de petit-lait.

D.5.1 Facteur d'échelle

Comme indiqué dans l'introduction une des premières différences à considérer dans cette étude est le facteur d'échelle. Les différences d'échelles entre les installations prises en référence sont exprimées dans le tableau 25. On voit que l'installation de production de bio-éthanol considère un gisement de matière première 120 fois plus grand. En effet :

- la production de bio-éthanol est envisagée dans une installation de production centralisée, d'une capacité équivalente à 332'500 m³ de petit-lait brut par an
- la production de biogaz est ici envisagée de façon décentralisée à l'échelle d'une fromagerie, avec une capacité de 2'800 m³ de petit-lait brut par an

	Filière bio-éthanol	Filière biogaz
Capacité de traitement de l'installation, en m ³ de petit-lait brut par an	332'500 m ³	2'800 m ³
Capacité de production globale	6'720'000 litres	122'600 m ³
Production d'énergie par an (carburant/combustible)	143'136'000 MJ (bio-éthanol)	2'199'000 MJ (biogaz)

Tableau 25 : Facteur d'échelle entre les filières

D.5.2 Aspects économiques

Compte tenu de la différence du facteur d'échelle et de la valeur marchande du produit fini, l'aspect économique est donné uniquement à titre indicatif.

Les coûts de valorisation du petit-lait sont indiqués dans le tableau 26. Il sont ramenés à un m³ de petit-lait brut valorisé. On observe que la filière bio-éthanol présente un coût d'investissement bas et des coûts d'exploitation élevés. Par comparaison la filière biogaz décentralisée présente un coût d'investissement élevé.

A la différence de la filière biogaz, où la fromagerie assume l'ensemble des coûts et des recettes liés à la production et à la valorisation du biogaz, la filière bio-éthanol fait intervenir un acheteur externe. AlcoSuisse estime le prix de vente du bio-éthanol sur le marché suisse à 1.40 CHF/litre, compte tenu de l'absence de taxe sur les biocarburants. Dans ces conditions, le coût d'opportunité du petit-lait brut, c'est à dire le prix auquel on pourrait le rémunérer, est de 1.15 CHF/tonne (/m³ si on considère une densité de 1.0).

	Filière bio-éthanol	Filière biogaz
Investissement, en CHF/m ³	6.35 ^(a)	21.7 ^(b)
Exploitation, en CHF/m ³	20.75	3.9
Coût global de valorisation, en CHF/m ³	27.1	25.6
Prix de vente du bio-éthanol (CHF/m ³) sur la base de 1.40 CHF/lit	- 28.3	
Possibilité rémunération du PL (CHF/m ³)	1.15	

(a) Investissement pour la concentration et le transport du petit-lait (120 km) et la production de bioéthanol (source : AlcoSuisse)

(b) Investissement pour la production de biogaz et son utilisation en chaudière (selon offres 2004)

Tableau 26 : Coûts de valorisation du petit-lait pour les deux filières

D.5.3 Impacts environnementaux

On rappelle que la comparaison des deux filières s'effectue sur les bases suivantes :

- impact de la substitution de mazout par du biogaz pour alimenter la chaudière d'une fromagerie, sur la base de la quantité de biogaz produite à partir d'un m³ de petit-lait
- impact de la substitution d'essence par de l'essence5 (avec 5% de bioéthanol) pour faire rouler une voiture (Ford focus), sur la base de la quantité de bioéthanol produite à partir d'un m³ de petit-lait

Consommation des ressources d'énergies fossiles

Les résultats sur la consommation des ressources énergétiques, exprimée en **MJ_{eq} d'énergie fossile économisée**, sont représentés sur la figure 38 pour chacune des filières. On observe une différence minime (5%) entre les deux filières de valorisation énergétique. L'une comme l'autre permette d'économiser environ 700 MJ_{eq} soit encore plus de 20 litres pétrole eq par m³ de petit-lait.

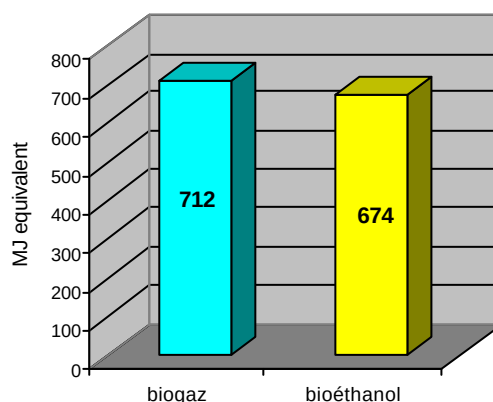


Figure 38 : Energie fossile économisée pour chacune des filières

Impact sur l'effet de serre

Les résultats sur l'effet de serre, exprimés en **kg CO_{2eq} évités**, sont représentés sur la Figure 39 pour chacune des filières. Encore une fois la différence est minime (3%) entre les deux filières. Elles permettent d'éviter la production de plus de 60 kg CO_{2eq} par m³ de petit-lait.

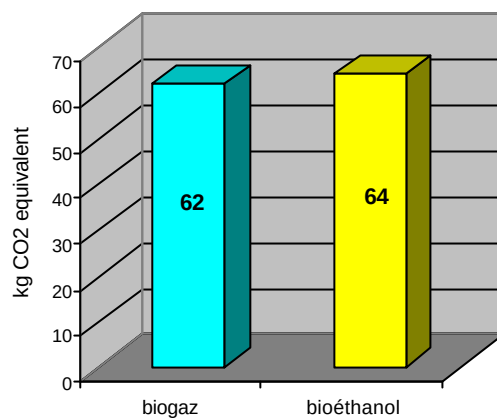


Figure 39 : CO₂ évité pour chacune des filières

D.6 CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE ET PERSPECTIVES

La deuxième voie possible de valorisation énergétique du petit-lait considérée dans cette étude est la production de bioéthanol. Il faut noter, qu'au contraire de la partie sur biogaz qui utilise les résultats d'une étape expérimentale, la filière bioéthanol à partir de petit-lait se base principalement sur des données théoriques et de la littérature.

La production de bio-éthanol ne peut s'envisager que dans une installation centralisée. L'unité de production envisagée dans cette étude traite plus de 100 fois plus de petit-lait que la fromagerie de référence de la filière biogaz. Dans un premier temps le petit-lait est concentré et les protéines sont séparées et valorisées dans 7 unités de pré-traitement. Puis le perméat contenant le lactose est transporté jusqu'au centre de production de bio-éthanol. Après une pasteurisation flash le petit-lait est fermenté afin de produire un vin à 5-5.5% d'alcool, puis distillé pour produire le flegme à 93% d'alcool et enfin déshydraté.

Le bio-éthanol peut être utilisé pour substituer de l'essence dans une limite de 5% (essence5) et être utilisé comme carburant sans modification des moteurs. Le coût de production de bio-éthanol dans les conditions de la présente étude (notamment un transport sur 120 km en moyenne) est de 1.34 CHF/litre de bioéthanol produit, ce qui correspond à 27 CHF par m³ de petit-lait brut. AlcoSuisse estime le prix du marché à 1.40 CHF/litre de bioéthanol. Dans les conditions de détaxe appliquée au biocarburants, le petit-lait pourrait être rémunéré à 1.15 CHF/m³.

Une analyse de cycle de vie (ACV) a été réalisée pour comparer les deux filières d'un point de vue environnemental. L'analyse a été faite par le Laboratoire des Systèmes Energétiques de l'EPFL, qui avait déjà conduit plusieurs études sur les biocarburants, notamment pour AlcoSuisse. La méthode employée est Ecoindicator 99, mais seulement deux types d'impact sont considérés ici : la consommation des ressources en énergie fossile et l'impact sur l'effet de serre. Afin d'avoir des résultats cohérents, l'analyse a consisté à comparer les effets de la substitution du mazout par du biogaz avec les effets de la substitutions de l'essence par du bioéthanol dans le mélange essence 5.

Pour les deux critères considérés, la différence des impacts spécifiques de chacune des deux filières étudiées est minime (moins de 5%). La valorisation d'un m³ de petit-lait en bio-carburant ou en bio-combustible permet d'économiser environ 700 MJ_{eq}, soit **plus de 20 litres équivalents pétrole** d'énergie fossile et représente environ **60 kg CO_{2eq} évités**. Cependant seuls deux critères sur les onze proposés dans la méthode ont été retenus dans l'étude. Il n'est donc pas exclu que des critères comme ceux liés par exemple aux impacts sur la santé humaine ou sur les écosystèmes, des émissions dans l'air, l'eau ou le sol, présentent des différences significatives. Rappelons que le choix de ces deux critères a été fait sur la base d'une part de la disponibilité et de la fiabilité des données pour les filières de valorisation étudiées, et d'autre part de l'existence d'une quantification des impacts associés.

Les perspectives de la valorisation énergétique du petit-lait sont donc très prometteuses. On pourrait envisager d'utiliser les deux filières étudiées ici compte tenu de leur spécificité : la filière biogaz sur site pour les fromageries moyennes et/ou décentralisées, et la filière bio-éthanol pour les gros centres de production.

E. LISTE DES ABREVIATIONS

ACV	analyse de cycle de vie
AGV	acides gras volatils
COV	charge organique volumique (kg DCO/m ³ .j)
DCO	demande chimique en oxygène
EH	équivalent habitant
MES	matière en suspension
MS	matière sèche
MSV	matière sèche volatile
N-am	azote ammoniacal
NTK	azote total Kjehldal
TRH	temps de rétention hydraulique (j)

F. ANNEXES

ANNEXE 1 : RESULTATS DU FONCTIONNEMENT DU BIOREACTEUR

Figure 1.1 : Alimentation en petit-lait et production de biogaz

Figure 1.2 : Température dans le bioréacteur

Figure 1.3 : Pourcentage de méthane dans le biogaz

Figure 1.4 : Evolution du pH et de l'alcalinité

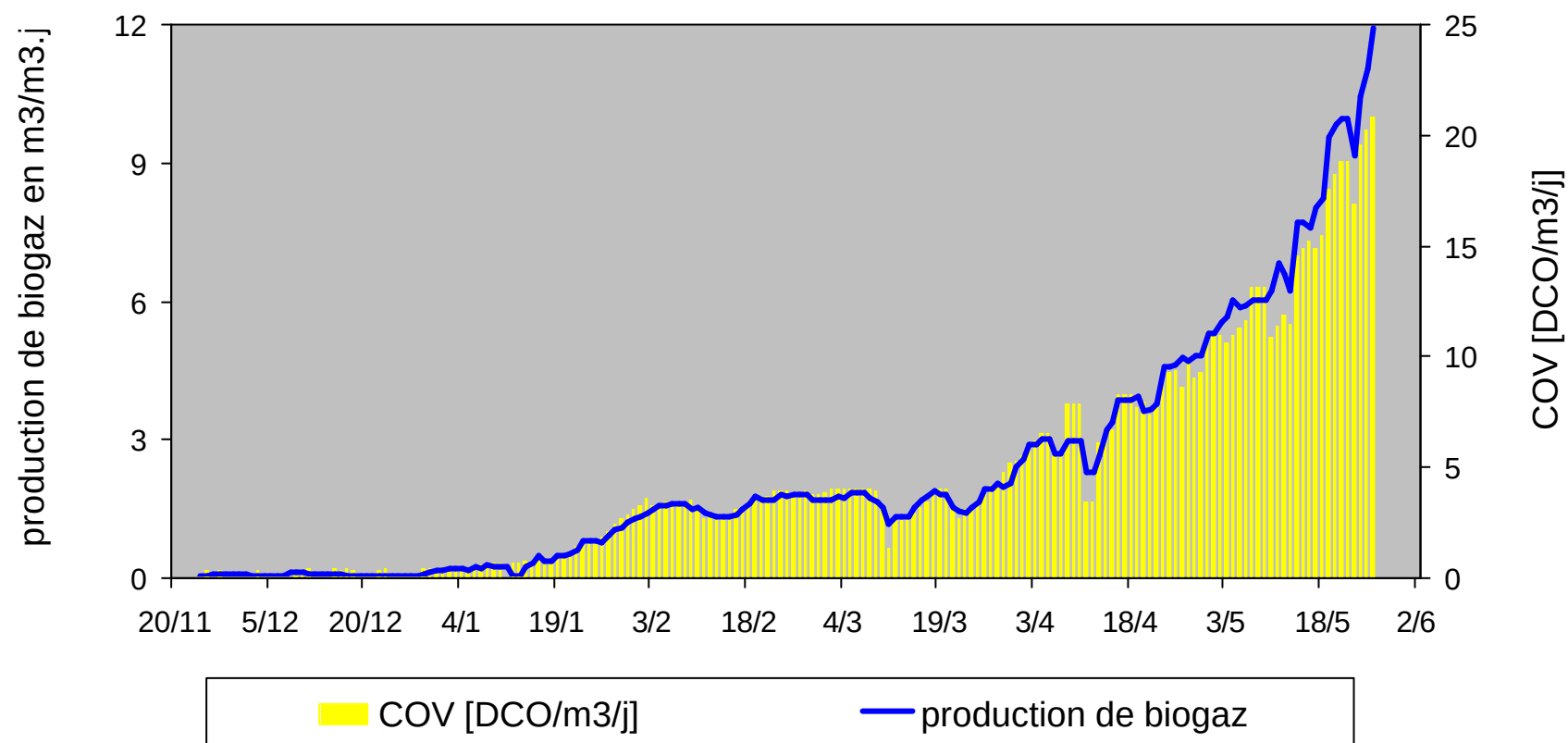
Figure 1.5 : Evolution des acides gras volatils et du lactate

Figure 1.6 : DCO du petit-lait frais et digéré

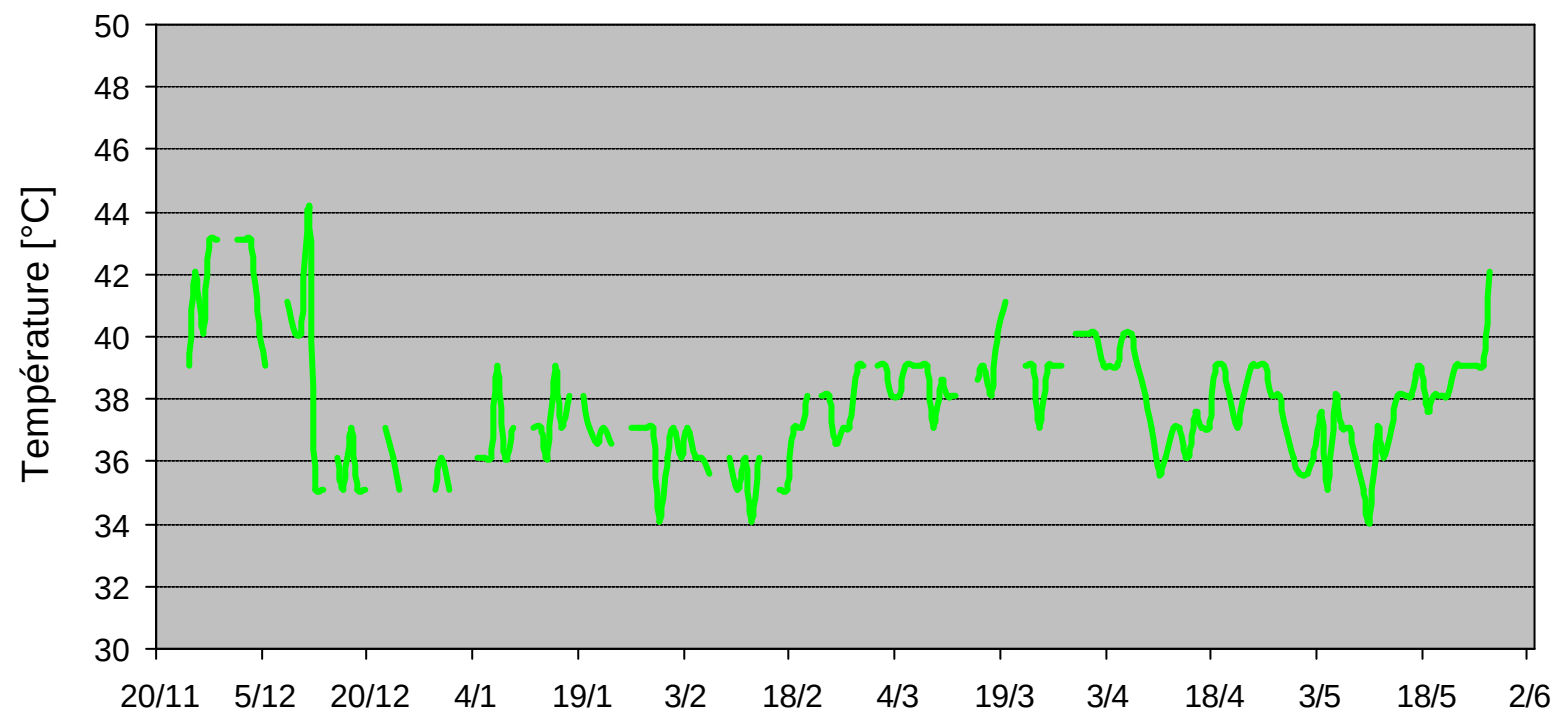
Figure 1.7 : Rendement de dégradation de la DCO

Figure 1.8 : Rendement en méthane

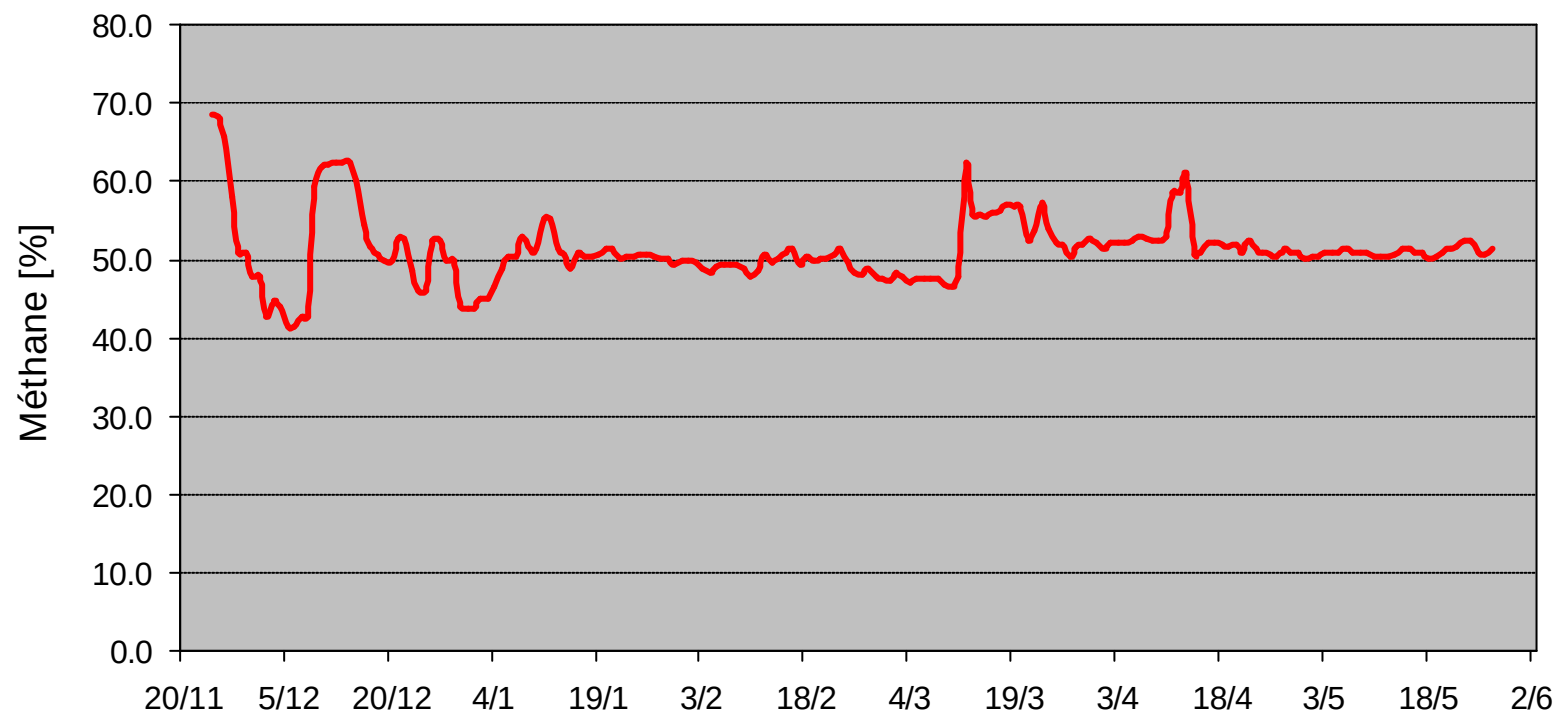
Alimentation du petit-lait et production de biogaz



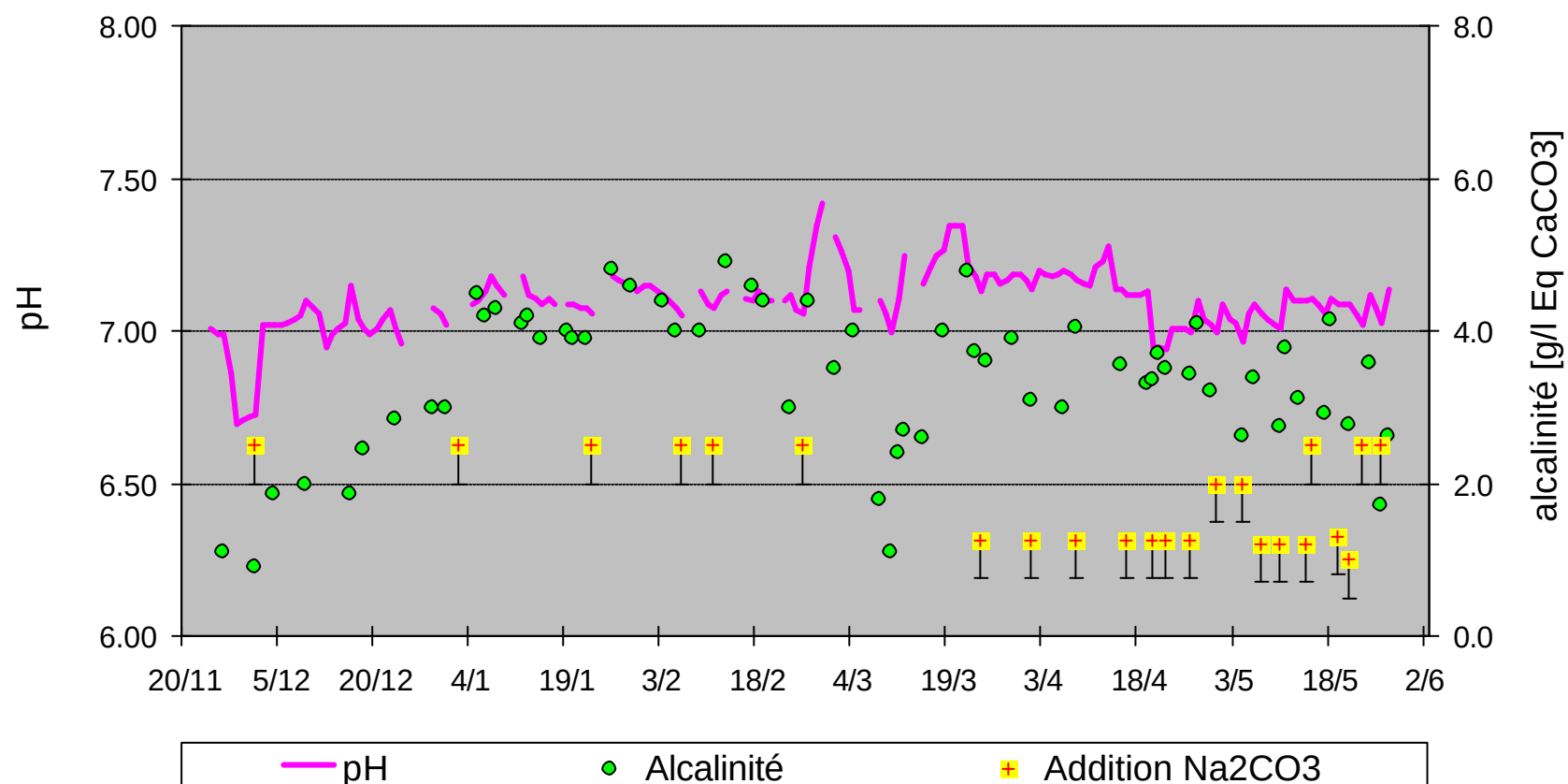
Température dans le bioréacteur



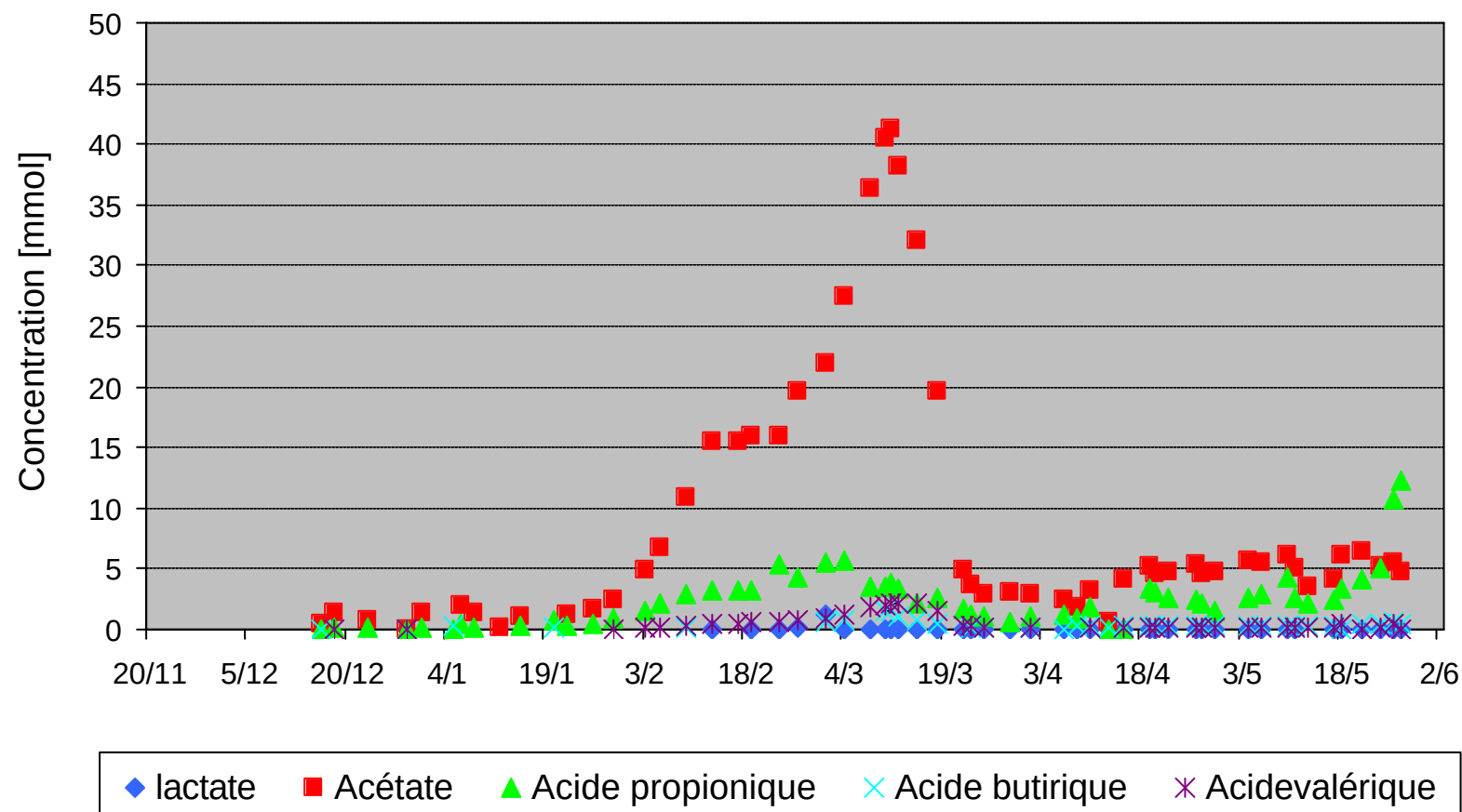
Pourcentage de méthane dans le biogaz



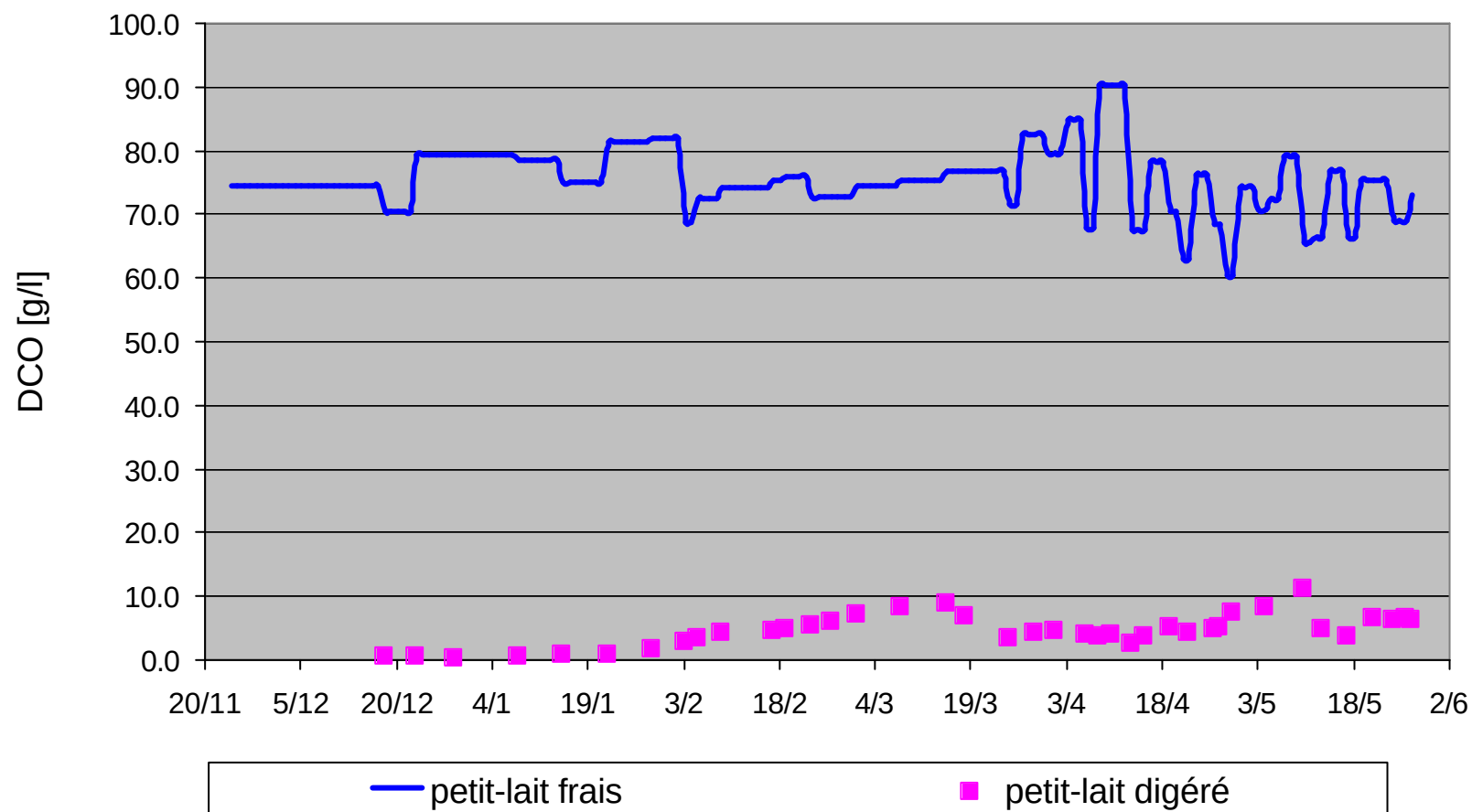
Evolution du pH et de l'alcalinité



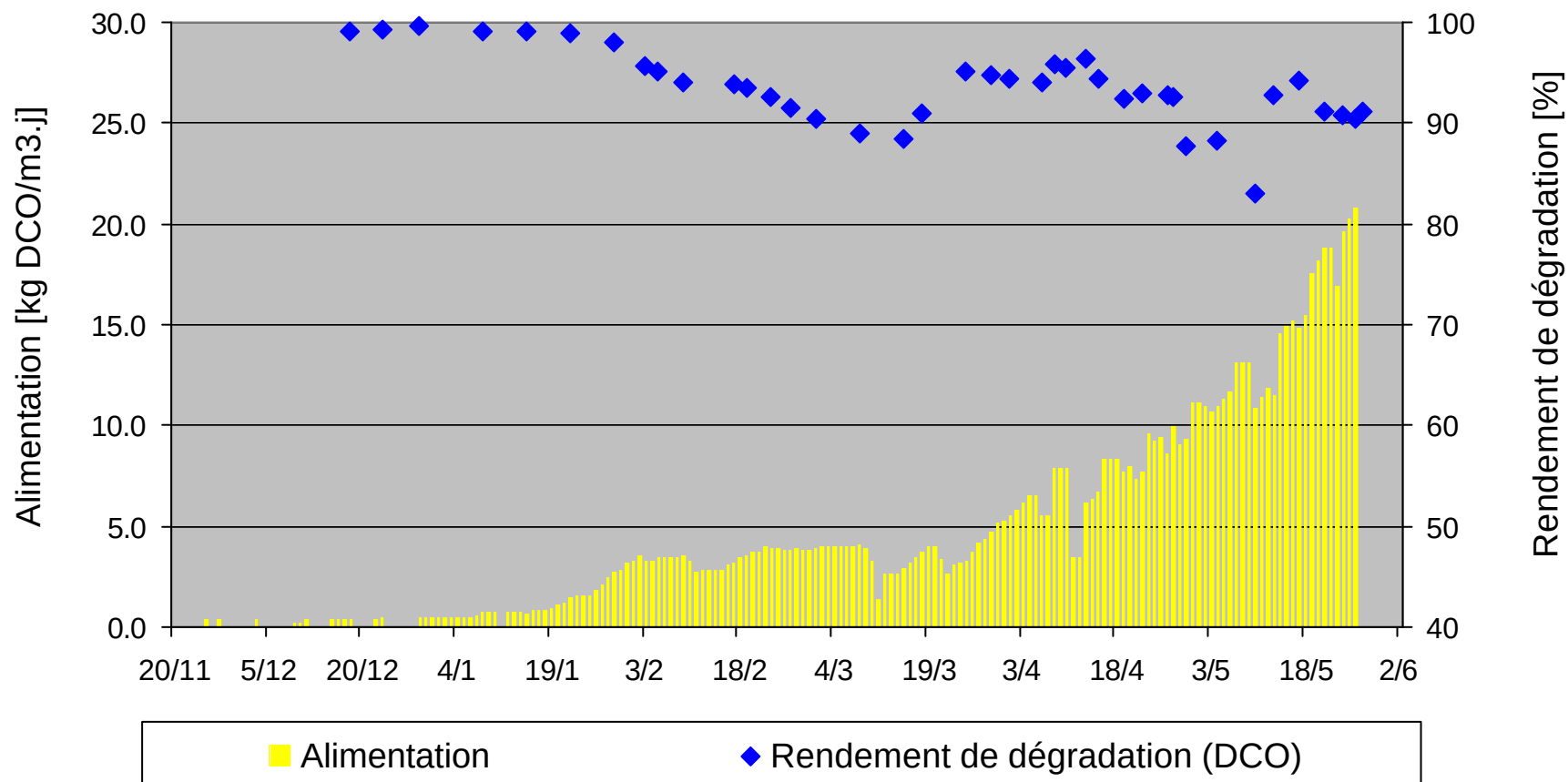
Evolution des acides volatils et du lactate



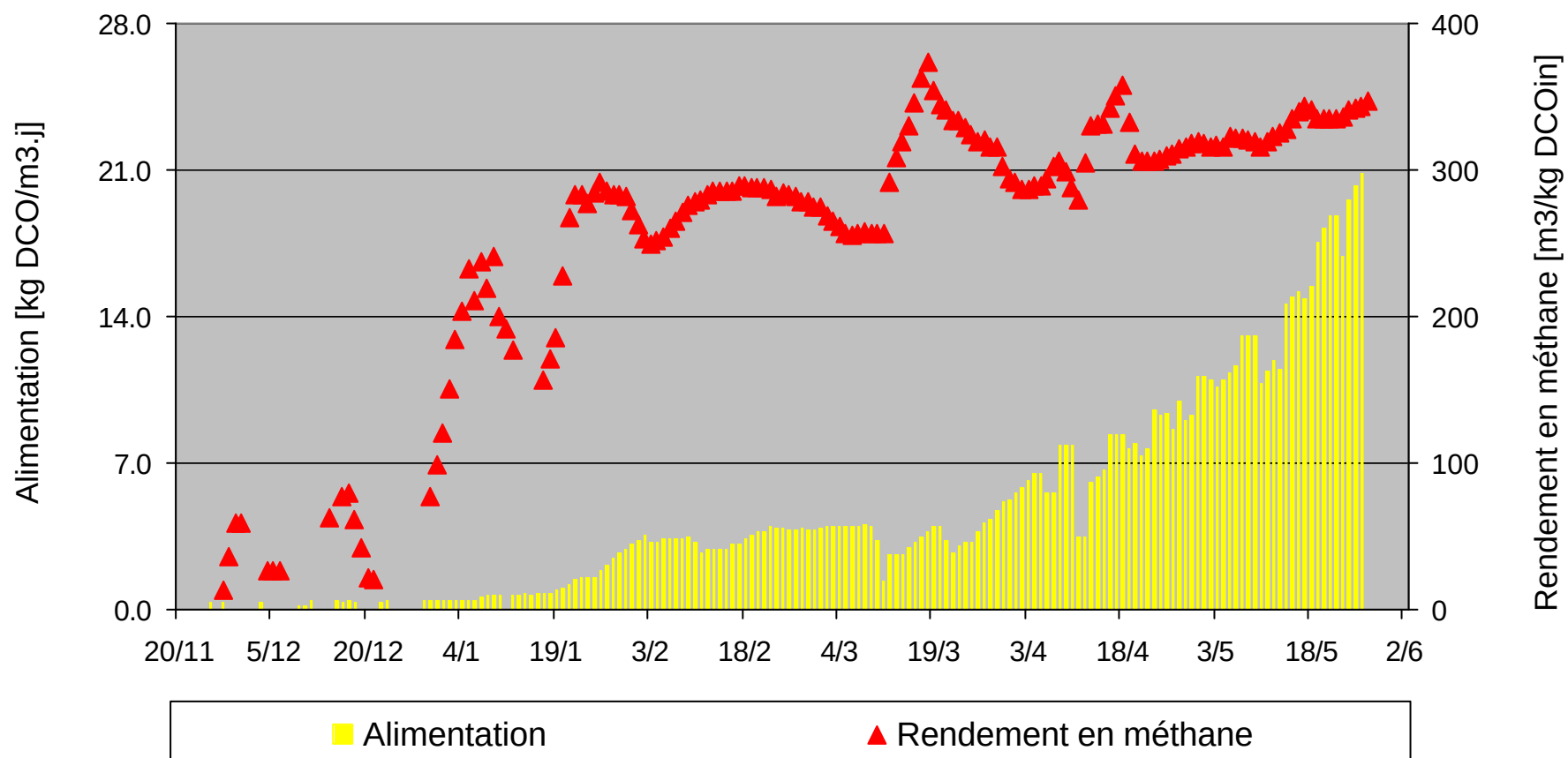
DCO du petit lait frais et digéré



Rendement de dégradation de la DCO



Rendement en méthane



ANNEXE 2 : SOLUTION ELEMENTS TRACE

Composition en grammes pour une solution de 1000 litres :

Nitrilotriaceticacid	15
MgSO ₄ · 7 H ₂ O	30
MnSO ₄ · 2 H ₂ O	5
NaCl	10
FeSO ₄ · 7 H ₂ O	1
CoSO ₄ · 7 H ₂ O	1.8
CaCl ₂ · 2 H ₂ O	1
ZnSO ₄ · 7 H ₂ O	1.8
CuSO ₄ · 5 H ₂ O	0.1
LaI(SO ₄) ₂ · 12 H ₂ O	0.2
H ₃ BO ₃	0.1
Na ₂ MoO ₄ · 2 H ₂ O	0.1
NiCl ₂ · 6 H ₂ O	0.25
Na ₂ SeO ₃ · 5 H ₂ O	0.003

ANNEXE 3 : ILLUSTRATIONS PHOTOGRAPHIQUES

Le bio-réacteur



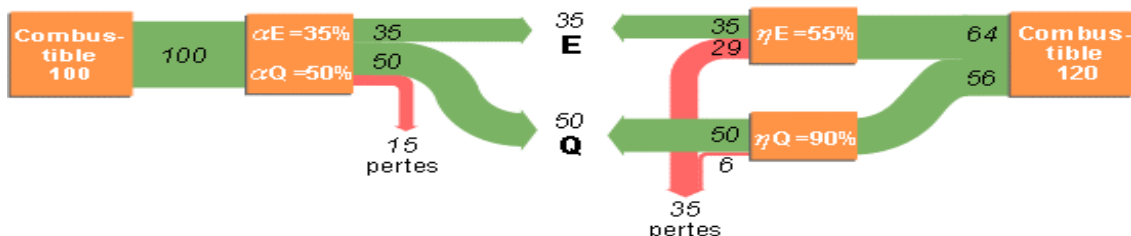
Le support avec le bio-film bactérien



Cuve d'alimentation



ANNEXE 4 : COGENERATION



	Energie disponible sous forme de biogaz (kWh/jour)	Energie électrique produite (kWh/jour)	Chaleur récupérable (kWh/jour)
janvier	1712	556	909
février	1250	403	659
mars	892	286	468
avril	808	258	423
mai	752	248	406
juin	758	250	409
juillet	690	228	373
août	859	275	450
septembre	2554	843	1379
octobre	2656	877	1434
novembre	2794	922	1509
décembre	2344	773	1266
Moyenne annuelle	1430 kWh	468 kWh	765 kWh
Total annuel	550740 kWh/an	180397 kWh/an	295196 kWh/an

ANNEXE 6 : DESCRIPTION DE LA PRODUCTION DE BIO-ETHANOL

Source : LASEN / AlcoSuisse

Description technique du procédé

Le petit-lait concentré est livré à l'usine par camion citerne isotherme, une bascule permettant d'enregistrer la quantité livrée. Le camion est ensuite raccordé par flexible à une pompe de déchargement. Lors de ce déchargement, le petit-lait est refroidi à 6°C dans un échangeur, avant d'être stocké dans un réservoir réfrigéré équipé d'agitateurs. Des pompes alimentent l'unité de fermentation après pasteurisation flash.

L'unité de **fermentation** vise à produire un vin à 5-5.5% (vol.) d'éthanol, à partir de petit-lait concentré. La fermentation est réalisée selon un régime discontinu et comprend deux étapes successives, à savoir (1) la pré-fermentation (procédé continu) d'une fraction du petit-lait concentré destinée à produire les levures nécessaires à la fermentation alcoolique, et (2) la fermentation alcoolique (procédé discontinu) qui a pour objet de transformer les sucres en alcool par l'intermédiaire des levures, à partir d'un moût fort à environ 12% de lactose. Un recyclage partiel des vinasses, flegmasses et condensats est réalisé (voir tableau 6.1), de façon à réduire le volume des effluents liquides. La durée de fermentation est d'environ 30 heures. La fermentation comporte ici 6 fermenteurs équipés chacun d'une boucle de refroidissement. Les fermenteurs sont vidangés dans un bac à vin muni d'un agitateur et d'une pompe pour alimenter la distillation. L'unité de fermentation comporte également les équipements de préparation des sels nutritifs, un stockage d'acide ainsi qu'un dispositif de nettoyage en place (CIP).

L'atelier de **distillation** vise à produire un flegme à 93% (vol.) d'éthanol. La distillation des moûts à 5% (vol.) provenant de la fermentation est effectuée sur deux colonnes alimentées en parallèle, l'une fonctionnant sous pression et l'autre sous vide. Le schéma énergétique utilise le principe des colonnes de distillation à double effet, associé à la thermo-compression des vapeurs en tête de la colonne sous pression. Les vinasses soutirées en pied de colonnes sont vaporisées dans un séparateur, la vapeur d'eau ainsi produite étant aspirée afin de chauffer par injection directe la colonne sous pression ainsi que l'évaporateur de la déshydratation. Un ensemble d'échangeurs refroidit les vinasses de distillation, en réchauffant l'alimentation des colonnes. Une partie des vapeurs de tête de la colonne sous pression est condensée dans un évaporateur/séparateur tandis que l'autre partie assure le chauffage de la colonne sous vide par l'intermédiaire d'un bouilleur.

La **déshydratation** du flegme (éthanol hydraté à 93% vol.) issu de la distillation est réalisée par adsorption sur des tamis moléculaires avec régénération par différence de pression. Le flegme est surchauffé avant déshydratation, afin d'éviter tout risque de condensation dans les adsorbants. La déshydratation est réalisée de manière cyclique et séquentielle : adsorption, désorption. L'alternance des cycles rend cependant la production d'alcool continue. L'éthanol déshydraté est produit lors de la phase d'adsorption conduite sous pression. L'éthanol, après refroidissement, est envoyé au stockage.

Modélisation des flux de matière et d'énergie

De manière à établir un inventaire le plus complet possible des ressources consommées et des émissions directes occasionnées au long du procédé de production de l'éthanol, un modèle des flux de matière et d'énergie conçu par le LASEN a été appliqué dans le cadre de cette étude.

A partir d'une quantité de petit-lait traité par année, ce modèle établit, pour chacune la filière envisagée et selon des règles de fonctionnement spécifiques des unités de l'installation, les flux de matière circulant d'une unité à une autre jusqu'à l'obtention de l'éthanol anhydre et des vinasses, tout en tenant compte des compositions respectives de la matière première, des différentes réactions chimiques mises en jeu ou encore des taux recyclages envisagés à divers niveaux du procédé.

Utilisant les informations fournies par Interis, ce modèle a permis dans un premier temps de valider ces données, puis d'envisager la possibilité par la suite d'identifier les paramètres déterminants relatifs au procédé lui-même.

Un extrait du modèle de flux est présenté sur la figure 6.1, pour l'étape de fermentation du petit-lait concentré. Comme on peut le voir sur la figure, chacun des flux mis en jeu est décrit selon une composition type figurant dans la toute première colonne. Le modèle consiste ainsi à suivre, tout au long du procédé, la composition des différents flux en tenant compte des réactions engagées et des opérations propres à chacune des étapes. Reposant sur une approche de bilan, le modèle assure l'équilibre des masses d'étape en étape.

	Fermentation							
	Inputs						Outputs	
	Petit-lait	Eau	Eau de lavage	Sels	O2	V+F recycl.	Moût ferm.	CO2
Gaz naturel								
Amidon	0.0					0.0	0.0	
Non-amidon	247.2					53.7	301.0	
Lactose	1'764.8					103.4	579.5	
H2O	7'133.8	4'556.3	290.6			2'693.2	14'624.5	
O2	0.0				29.4	0.0	0.0	
Sels	0.0			5.4		0.0	0.0	
Ethanol	0.0					0.0	659.9	
CO2	0.0					0.0	0.0	671.5
Levures	0.0					9.0	50.5	
Total	9'145.8	4'556.3	290.6	5.4	29.4	2'859.4	16'215.4	671.5
MS	2'012.1	0.0	0.0	5.4	29.4	166.2	1'590.9	671.5
H2O	7'133.8	4'556.3	290.6	0.0	0.0	2'693.2	14'624.5	0.0
Total	9'145.8	4'556.3	290.6	5.4	29.4	2'859.4	16'215.4	671.5
%MS	22.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	5.8%	9.8%	100.0%

Figure 6.1 – Extrait du modèle de flux établi dans le cadre de l'étude

A la demande d'Interis, certaines des clés du modèle ne sont pas présentées dans ce rapport, concernant notamment les réactions de fermentation, pour des raisons de confidentialité. Certains des paramètres de bases sont cependant précisés dans le tableau 6.1.

Par manque d'information, les huiles de fusel ainsi que les mauvais goûts (issus des unités de distillation et de déshydratation) n'ont pas été considérés. L'erreur introduite est cependant jugée négligeable. Les consommations de ressources (acide sulfurique, soude, enzymes, sels minéraux, levures, anti-mousses, etc.) et d'énergie (vapeur et électricité) sont également prises en compte dans le modèle, au même titre que les émissions directes liées à l'étape de fermentation.

Tableau 6.1 – Paramètres de base du modèle de flux

Etapes / Paramètres	
Recyclage des vinasses (% masse)	18.0%
Recyclage des flegmasses et condensats (% masse)	25.0%
Teneur en alcool du moût de fermentation (% vol.)	05.4%
Rendement de conversion du lactose ($\text{g}_{\text{éthanol}}/\text{g}_{\text{amidon}}$)	0.375
Rendement de conversion du saccharose ($\text{g}_{\text{éthanol}}/\text{g}_{\text{sucrose}}$)	-
Teneur en alcool des flegmes de distillation (% vol.)	93.0%
Teneur en alcool de l'éthanol déshydraté (%vol.)	99.9%
Teneur en matières sèches des vinasses (% masse)	06.5%

Le modèle décrit précédemment a ainsi permis d'établir un diagramme complet des flux de matières et d'énergie pour la production d'éthanol déshydraté à partir de petit-lait concentré. Ces diagrammes des flux constituent la base principale de l'analyse de cycle de vie (ACV) réalisée dans le cadre de cette étude, mais également celle de l'analyse économique (plus particulièrement pour le calcul des coûts d'exploitation variables) .

Valorisation des vinasses

La production d'éthanol s'accompagne souvent de co-produits dont la valorisation contribue de façon non négligeable à équilibrer le bilan financier de la production de bio-éthanol. Le présent paragraphe vise dans le cas présent à caractériser les vinasses issues de la filière petit-lait (en termes de quantités annuelles mais également en termes de qualité) et aborde la question de la valorisation (resp. de l'élimination) de ces vinasses dans le contexte helvétique.

Les vinasses ici concernées résultent directement de l'étape de distillation du moût fermenté. Dans le cas de l'installation de référence étudiée, ces vinasses représentent un volume total de l'ordre de 12 t par heure, soit encore environ 100'000 t par an. Ces vinasses, à l'issue de la distillation, possèdent une teneur en matière sèche de l'ordre de 6.5% (en masse). Ces vinasses constituent potentiellement un additif de choix pour la fertilisation des sols dans le milieu agricole. Cependant, la question de la possibilité d'une quelconque valorisation dans ce secteur est particulièrement délicate et nécessiterait une étude beaucoup plus approfondie, liée à la localisation géographique potentielle de l'installation de production de bio-éthanol, du marché potentiel pour de tels volumes de vinasses. Dans le cas de la présente étude, il a été fait l'hypothèse que les vinasses seraient épandues sur les champs avoisinant l'usine, pour un coût nul, aussi bien pour les exploitants de l'usine que pour les agriculteurs. L'effet d'une telle hypothèse sur le bilan économique et sur le bilan environnemental sera envisagé dans le cadre d'une analyse de sensibilité.

Le tableau 6.2 présente les caractéristiques des vinasses de petit-lait, retenues dans le cadre de l'étude.

Tableau 6.2 – Caractéristiques des vinasses issues de la production de bioéthanol

Caractéristiques	
Co-produits	Vinasses de petit-lait
Teneur en eau (% masse)	93.5%
Prix franco usine d'éthanol	0 CHF
Quantités annuelles	95'300 t/an

D'une manière générale, tout comme le prix de vente des co-produits peut jouer un rôle essentiel dans l'évaluation du coût de production net du bio-éthanol, leur valeur économique intervient de façon majeure lors du processus d'allocation de l'ACV. Il est donc important d'avoir une estimation la plus exacte possible de la valeur économique future de tels co-produits. L'analyse de sensibilité abordée plus loin envisage, à ce titre, l'effet sur les résultats de l'ACV d'une variation à la baisse puis à la hausse de la valeur marchande des vinasses.

Traitement des effluents liquides

L'appellation "effluents liquides" concerne ici en particulier les fractions non recyclées de **flegmasses** (issues des étapes de distillation et déshydratation). La purge de la chaudière ainsi que celle du circuit de refroidissement sont traitées dans le paragraphe suivant.

Après vérification auprès des professionnels de la distillation, il apparaît, selon Interis (17), que le recyclage des flegmasses est actuellement limité à environ 20-25% du débit des flegmasses de distillation. Leurs calculs, à la base de modèle de flux du LASSEN, intègrent ces valeurs tout en tenant compte de la spécificité des unités envisagées. Le tableau 6.3 présente les quantités annuelles des divers effluents générés par l'installation et envoyés en méthanisation.

Tableau 6.3 – Détail des effluents liquides

Volumes annuels d'effluents liquides (m³/an)	
Flegmasses rejetées	07'030
Purge chaudière et circuit de refroidissement	15'110
Total	22'140

Les valeurs précisées correspondent aux conditions réelles de production envisagées par Alcosuisse dans le cadre de cette étude, à savoir un fonctionnement à pleine charge avec recyclage des flegmasses à hauteur de 25%. Dans des situations de démarrage et/ou périodes exceptionnelles où aucun recyclage des flegmasses n'est envisagé, le volume annuel d'effluents liquides peut atteindre 24'500 m³/an. La charge polluante moyenne des effluents est de 6'000 mg_{DCO}/l (17). Ces derniers sont traités en station d'épuration (STEP), pour un coût fixé à 1.50 CHF/t, comme dans le cas de la concentration.

Services

L'appellation "services" comprend ici l'unité de production de chaleur, l'approvisionnement en eau (procédé et refroidissement) ainsi que le système de refroidissement de l'usine. Chacun de ces éléments est ici décrit brièvement.

Unité de production de chaleur

La vapeur utilisée au cours des différentes étapes du procédé est produite par une chaudière à gaz naturel. Les consommations annuelles de vapeur figurent sur les diagrammes des flux. Les différentes unités utilisant essentiellement de la vapeur basse pression, l'utilisation d'un système de co-génération par turbine à gaz ou par turbine à vapeur permettrait de produire de l'électricité et éventuellement de réduire les coûts énergétiques. Pour des questions de taille critique de l'installation complète, cette option n'est cependant pas envisagée dans cette étude, et l'électricité est achetée sur le réseau. La purge de la chaudière est incorporée aux effluents liquides envoyés en STEP.

Système d'approvisionnement en eau

L'approvisionnement en eau de l'usine d'éthanol doit être en mesure de satisfaire les besoins en eau de procédé ainsi que l'appoint de la chaudière et du circuit de refroidissement. Les besoins en eau de l'ensemble de l'usine sont précisés dans le tableau 6.4.

Tableau 6.4 – Besoins journaliers en eau de l'usine d'éthanol

Besoins en eau selon les utilisations	(l/h)	(m ³ /an)
Eau de procédé	04'850	39'100
Appoint de la chaudière	00'040	00'320
Appoint du circuit de refroidissement	05'500	44'340
Total	10'390	83'760

Il convient à ce propos de noter que, sur les diagrammes des flux, la consommation d'eau au niveau de la chaudière, pour des raisons pratiques, comprend à la fois l'eau d'appoint de la chaudière (afin de compenser la purge de la chaudière), et l'appoint du circuit de refroidissement. De manière similaire, sur ces mêmes diagrammes, la purge de la chaudière est combinée à celle du circuit de refroidissement.

Les besoins en eau sont assurés par l'eau d'une rivière voisine. L'installation de traitement de cette eau de rivière, visant à satisfaire les critères de qualité de l'eau de refroidissement et de procédé, comporte une première étape de coagulation, une étape de filtration sur sable et enfin une désinfection UV. L'installation comprend par ailleurs une bâche d'eau traitée. Il n'y a en revanche pas de bâche d'eau brute (21). Le dimensionnement de l'installation ainsi que le prix de revient de l'eau a été évalué par RWB (21) dans le cadre du projet Alcosuisse.

Système de refroidissement

Le système de refroidissement intervient essentiellement au niveau des étapes de fermentation et de recouvrement de l'éthanol (distillation et déshydratation). Le système envisagé ici utilise une tour de refroidissement, dissipant la chaleur dans l'atmosphère et limitant sensiblement les quantités d'eau dérivées de la rivière.

Les besoins en eau d'appoint pour le circuit de refroidissement (avec une marge de réserve de 20%) ont été évalués à 130 m³/j (Planair, 2004). De ce volume journalier prélevé à la rivière, deux tiers (soit environ 90 m³/j) sont évaporés dans la tour, tandis que le tiers restant est directement restitué à la rivière, sans traitement.

ANNEXE 7 : ECONOMIE DE LA PRODUCTION DE BIOÉTHANOL

Source : LASEN / AlcoSuisse

Concentration du petit-lait

L'installation de référence envisagée dans le cadre de la présente étude repose essentiellement sur différentes publications de la Station Fédérale de Recherche Laitière (13, 14, 15). Dans l'article « Nanofiltration, Schlüsseltechnologie zur Verwertung von Nebenprodukten » (13), paru dans Deutsche Milchwirtschaft, la FAM présente l'analyse économique et la performance d'une installation de nanofiltration d'une capacité de traitement de 50'400 t/an de perméat UF, soit une capacité de production de l'ordre de 11'500 t/an de petit-lait concentré à 22% MS. Par manque de données quantitatives relatives à l'unité d'ultrafiltration, cette dernière est ici décrite à partir du bilan de masse prévisionnel et des indications de la FAM (15). L'unité d'ultrafiltration possède ainsi une capacité de traitement de petit-lait de 52'130 t/an.

L'analyse économique de l'unité de concentration (y compris la réfrigération) est ici réalisée pour la même installation de référence introduite plus haut, d'une capacité de traitement de 52'130 t/an de petit-lait brut, soit une capacité de production de petit-lait concentré à 22%MS d'environ 11'560 t/an. L'approvisionnement de l'usine d'éthanol sera ainsi assuré au moins par 7 unités de concentration d'une telle capacité.

Le calcul du coût de production repose sur une évaluation des dépenses annuelles ramenées à une unité de production, à savoir ici une tonne de petit-lait concentré. Les dépenses annuelles sont décomposées en frais d'investissement et frais d'exploitation fixes et variables. Le détail du coût de production est donné dans le tableau 7.1, selon chacune des trois composantes.

Tableau 7.1 – Détails des coûts de production du petit-lait concentré

Composantes de coûts		Dépenses annuelles		Coût de production	
Coûts d'investissements					
Ultrafiltration	60'400	CHF/an	5.20	CHF/an	
Nanofiltration	58'860	CHF/an	5.10	CHF/an	
Coûts additionnels (y compris terrain)	68'080	CHF/an	5.90	CHF/an	
Total	187'340	CHF/an	16.20	CHF/t	
Coûts d'exploitation variables					
Petit-lait brut (6%MS, 50°C)	0	CHF/an	0.00	CHF/an	
Acide sulfurique	1'470	CHF/an	0.10	CHF/an	
Soude	1'700	CHF/an	0.10	CHF/an	
Eau de lavage	11'110	CHF/an	1.00	CHF/an	
Vapeur	5'410	CHF/an	0.50	CHF/an	
Electricité	23'380	CHF/an	2.00	CHF/an	
Traitement des effluents	74'140	CHF/an	6.40	CHF/an	
Membranes	43'680	CHF/an	3.80	CHF/an	
Réfrigération	115'650	CHF/an	10.00	CHF/an	
Total	276'540	CHF/an	23.90	CHF/t	

<i>Coûts d'exploitation fixes</i>				
Salaires	75'000	SFr/an	6.50	CHF/t
Frais généraux	45'000	SFr/an	3.90	CHF/t
Maintenance, entretien	13'400	SFr/an	1.20	CHF/t
Assurances, taxes	16'650	SFr/an	1.40	CHF/t
Total	150'050	CHF/an	13.00	CHF/t
<i>Recettes des co-produits</i>				
Retentat UF (protéines)	-218'120	CHF/an	-18.90	CHF/t
Total	395'810	CHF/an	34.20	CHF/t

Le coût de production dans le tableau 7.1 est indiqué en CHF par tonne de petit-lait concentré à 22%. Il est en outre considéré, dans le calcul des frais annuels d'investissement, un taux d'intérêt de 5% et un amortissement linéaire de l'ensemble de l'investissement sur 8 ans. La composante 'salaires' correspond à un poste de technicien de maintenance, les frais généraux représentant 60% des salaires. Les frais annuels liés aux taxes et assurances ont été pris égaux à 1.5% de l'investissement total du projet tandis que l'entretien et la maintenance ont été fixés à 2.0% du coût de l'équipement. Par ailleurs, les hypothèses relatives aux prix des différents consommables ont été les suivantes. Les prix de l'acide et de la soude ont été respectivement pris égaux à 510 et 920 CHF/t. Le prix de la tonne de vapeur (utilisée ici pour le nettoyage des installations) a été fixé à 42.50 CHF/t, tandis que celui de l'électricité est de 12.5 cts/kWh. L'eau industrielle utilisée pour le lavage revient à 1.20 CHF/m³, tandis qu'un coût du traitement des effluents liquides (perméat NF, eaux de lavage) de 1.50 CHF/m³ a été considéré. Le coût de la réfrigération (figurant ici dans les coûts d'exploitation) a été fixé à 10 CHF/m³ de petit-lait concentré, selon les chiffres publiés par la Fédération des Producteurs Suisses de Lait (PSL), et inclut l'ensemble des frais d'exploitation fixes et variables ainsi que l'amortissement des installations de réfrigération.

Un coût d'opportunité (ou «shadow price») de l'ordre de 130 CHF/t a été attribué au retentat UF (protéines à 25%MS). Ce dernier, correspondant théoriquement à la valeur maximale, sur l'ensemble des filières de valorisation des protéines, du prix du produit final diminué des coûts de traitement du retentat UF, représente des recettes de l'ordre de 220 kCHF/an, couvrant ainsi la totalité des coûts de l'étape d'ultrafiltration (UF). L'effet d'une telle hypothèse sur les bilans économique et environnemental sera envisagé dans l'analyse de sensibilité.

Du point de vue de la logistique, il est fait l'hypothèse que ces installations d'ultrafiltration et de nanofiltration sont entièrement intégrées à la fromagerie, bénéficiant ainsi de l'installation de production de chaleur (vapeur), du personnel, des installations de stockage, etc. Selon les ressources (petit-lait 25%MS et perméat 25%MS) identifiées par Planair SA dans le cadre du projet Alcosuisse (16), la taille de l'installation de concentration décrite dans ce chapitre, correspond à la capacité de production des divers fournisseurs retenus à l'époque.

Le coût de production total du petit-lait concentré à 22% est ainsi évalué à 34.20 CHF/t. Celui-ci est ensuite acheminé par camions jusqu'au site de l'usine de bioéthanol.

Transport du petit-lait concentré jusqu'à l'usine d'éthanol

Le détail de l'étape de transport du petit-lait concentré à 22% depuis le site de nanofiltration jusqu'à l'usine d'éthanol résulte d'une offre de Translait à Alcosuisse en 2002. Le transport est effectué par poids lourds (EURO III, 34 tonnes), sur une distance moyenne de 120 km. Selon indications de M. Krummenacher (communication écrite, 10.2004), le coût du transport s'élève à 37 SFr par tonne de charge utile (soit encore 0.308 CHF/t.km) et inclut la redevance poids lourds (RPLP) aux nouveaux tarifs annoncés pour 2005. Le petit-lait concentré étant chargé à une température de l'ordre de 5°C, aucune réfrigération des citernes n'est envisagée pour une telle distance de transport (selon indication orale de M. Hirschi, Aquaren, 2004). Le prix de revient d'une tonne de petit-lait concentré à 22%MS est donc de 71.20 CHF/t, franco usine de production d'éthanol.

Production d'éthanol à partir de petit-lait concentré

L'analyse économique réalisée décrite ici vise essentiellement à évaluer le coût de production du bioéthanol, afin d'effectuer l'allocation des charges environnementales entre le bioéthanol et les vinasses. Le calcul du coût de production repose sur une évaluation des dépenses annuelles ramenées à une unité de production, à savoir ici un litre de bioéthanol. Les dépenses annuelles sont décomposées en frais d'investissement et frais d'exploitation fixes et variables. Chacune de ces trois composantes est abordée de manière individuelle dans les paragraphes qui suivent.

Frais annuels d'investissement

Le détail des investissements de l'usine est précisé par Interis (17) pour la grande majorité des unités de traitement. L'investissement pour les différents ateliers procédé comprend les études et l'ingénierie, la fourniture des équipements, les travaux de génie civil d'unité, la charpente métallique, les travaux de montage des équipements et des tuyauteries à l'intérieur de chaque atelier et enfin le calorifuge. Les frais d'investissement additionnels (fourniture d'utilités, racks et liaisons de tuyauterie entre les unités, montage du système électrique et du contrôle, la coordination des travaux réalisés, équipement de stockage, etc.) ont été répartis entre les différentes unités de traitement au prorata des investissements spécifiques de chaque unité. L'investissement pour l'unité de production de chaleur a été réparti entre les unités de traitement selon leurs consommations respectives de vapeur.

Les frais annuels d'investissement sont calculés à partir des investissements bruts au moyen du facteur d'annuité. Selon Helbling (22), en considérant des durées d'amortissement différenciées pour les bâtiments, le terrain, l'équipement et les voies d'accès, le facteur d'annuité moyen est de l'ordre de 9%. Ce facteur permet ainsi d'évaluer les frais annuels d'investissement pour chacune des filières et pour l'ensemble de l'usine. Les frais annuels d'investissement s'élèvent ainsi à 920 kCHF/an pour l'ensemble de l'installation.

Coûts d'exploitation fixes annuels

Les coûts d'exploitation fixes comprennent les salaires, mais également les frais généraux, la maintenance, ainsi que tous les frais annuels liés aux assurances et aux taxes. Le nombre de personnes employées dans l'usine a été évalué par R. Morand (22) à 12 personnes. Le salaire moyen est de l'ordre de 90'000-95'000 CHF/an. Les frais généraux sont calculés selon un pourcentage (ici 60%) des dépenses annuelles de salaires, et comprennent tous les éléments tels que la sécurité, les bonus de salaires, l'ingénierie générale, le téléphone, la lumière, le chauffage, la conciergerie, etc (23). La maintenance de l'usine est prise en compte selon un pourcentage (ici 2%) du coût total de l'équipement. Il en est de même pour

les assurances et les taxes, avec 1.5%. L'ensemble des coûts d'exploitation fixes est présenté dans le tableau 7.2

Tableau 7.2 – Détail des coûts d'exploitation fixes annuels (kSFr)

Composantes de coûts	
Salaires	1'100'000
Frais généraux	0'660'000
Maintenance	0'210'000
Taxes et assurances	0'150'000
Total (kCHF/an)	2'120'000

Coûts d'exploitation variables annuels

Les coûts d'exploitation variables comprennent les dépenses liées à l'approvisionnement en matières premières (petit-lait), en ressources (produits chimiques, eau, nutriments, enzymes, levures, etc.), en énergie (gaz, électricité), mais également les dépenses liées au traitement des effluents. Le tableau 7.3 précise les prix unitaires (franco usine de bioéthanol) des ressources consommées et des co-produits, ainsi que les sources pour chacune des valeurs.

Tableau 7.3 – Détail des prix unitaires des différentes ressources consommées dans le procédé (SFr)

Ressources et co-produits	Prix unitaire		Source
Petit-lait concentré	71.20	CHF/t	LASEN
Acide sulfurique	165	CHF/t	Planair
Soude	195	CHF/t	Planair
Antimousses	3'000	CHF/t	Interis
Phosphates	821	CHF/t	Interis
Sulfates	194	CHF/t	Interis
Eau de procédé et refroidissement	0.24	CHF/t	RWB
Gaz naturel	32.50	CHF/MWh	Helbling
Electricité	125	CHF/MWh	Helbling
Vinasses de petit-lait	0	CHF/t	LASEN

Les prix de l'acide sulfurique et de la soude résultent d'offres faites à Alcosuisse (compte tenu des quantités annuelles mises en jeu et de la concentration). Les prix des sulfates, phosphates et antimousses sont issus de diverses offres faites à Interis dans le cadre de projets similaires au projet Alcosuisse. Les prix de l'électricité et du gaz naturel proviennent d'estimations de Helbling (22). Le prix de l'eau est issu du rapport de RWB pour le projet Alcosuisse (21), et comprend les coûts de pompage, de traitement, de maintenance et les coûts d'investissement du système d'approvisionnement d'eau. Le bilan des coûts d'exploitation variables est donné dans le tableau 7.4.

Tableau 7.4 – Détail des coûts d'exploitation variables annuels (SFr/an)

Composantes de coûts	
Matières premières	5'253'000
Acide sulfurique	21'300
Soude	39'300
Antimousses	9'700
Phosphates	27'800
Sulfates	2'500
Eau	19'700
Gaz	467'900
Electricité	95'800
Traitement des effluents liquides	33'300
Co-produits	0
Matières premières	5'253'000
Crédit co-produits	0
Total (hors MP et CP)	717'300
Total (CHF/an)	5'970'300

Calcul d'allocation

L'analyse économique présentée dans le paragraphe précédent a pour but essentiel le calcul du coût de production du bioéthanol à partir du petit-lait. Une approche alternative, par étapes de la chaîne de production, est ici envisagée dans le but de déterminer, d'une part, les facteurs d'allocations, et d'autre part, le coût d'opportunité du petit-lait pour la filière éthanol. Les résultats de cette analyse économique par étape sont présentés dans le tableau 7.6.

Tableau 7.6 – Détail des coûts de traitement (kSFr/an) par étape et facteurs d'allocation spécifiques

Etapes de traitement	Coûts par étape (kCHF/an)	Facteurs d'allocation (%)
Concentration du petit-lait		
Ultrafiltration	1'390	21.5
Nanofiltration	1'740	100.0
Réfrigération	0'740	100.0
Transport	2'730	100.0
Production d'éthanol		
Pasteurisation flash	0'360	100.0
Fermentation	1'240	100.0
Distillation	1'310	100.0
Déshydratation	0'850	100.0
Total (kCHF/an)	3'760	-

Les coûts présentés comprennent à la fois les frais d'exploitation fixes et variable et les coûts liés à l'investissement. La répartition des frais d'exploitation fixes entre les diverses étapes a été effectuée selon les investissements spécifiques respectifs des étapes. Pour la production d'éthanol, on retrouve, par ailleurs, le total des coûts opérationnels fixes (2'120 kCHF/an) et variables (720 kCHF/an) et des coûts d'investissements (920 kCHF/an), soit 3'760 kCHF/an. En ce qui concerne les étapes de concentration, en revanche, les coûts diffèrent de ceux présentés dans le tableau 71. Les données présentées ici reflètent en effet les coûts de la filière dans sa globalité, soit la valorisation de 332'500 t de petit-lait par an, tandis que les coûts présentés dans le tableau 7.1 concernent une unité de concentration de référence, d'une capacité de 52'100 t/an.

L'évaluation des coûts spécifiques des différentes étapes permet ainsi, par une approche dite du "**shadow price**", d'évaluer la valeur économique des produits intermédiaires du procédé, mais également de déterminer le **coût d'opportunité** spécifique du petit-lait, pour la filière de valorisation en éthanol, et enfin de calculer les facteurs d'allocation pour chacune des étapes de la filière.

ANNEXE 8 : DONNEES DES ACV

Source : LASEN

Sources des données relatives à l'analyse de cycle de vie

La grande majorité des données utilisées pour l'évaluation de la consommation des ressources primaires et des émissions polluantes provient de la base de données Ecolnvent, développée au sein de différentes institutions de recherche suisses (EPFZ, EPFL, PSI, EMPA, EAWAG, FAL), suite à une initiative du Swiss Centre for Life Cycle Inventories et des Office Fédéraux. Cette nouvelle base de données constitue en quelques sortes une version plus aboutie et mise à jour de la base de données "Ökoinventare von Energiesystemen", développée initialement par le groupe Energie-Stoff-Umwelt (ESU) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich (EPFZ). Cette base de données particulièrement complète regroupe, selon une approche intégrée, les domaines de l'approvisionnement énergétique, du transport, des matériaux, du traitement des déchets, de l'agriculture, de la construction, de la technologie de l'information, etc.

Pour chacun des intrants intervenant dans les filières envisagées dans cette étude et ne figurant pas dans la base de données (enzymes, levures, mélasses, etc.), un enregistrement original, au format Ecolnvent, a été compilé par le LASEN, à partir de différentes informations, obtenues soit dans des études spécifiques, soit auprès d'industriels du domaine concerné.

Hypothèses sur les intrants

Ce paragraphe vise à préciser de manière détaillée, la façon dont les différents intrants ont été modélisés à travers l'analyse de cycle de vie réalisée ici. Les hypothèses sont précisées selon la chronologie de la chaîne de production, depuis le conditionnement et la mise à disposition de la matière première (petit-lait), jusqu'à la distribution du carburant

Par manque d'information, les différentes étapes de chargement/déchargement tout au long de la filière de production des carburants essence et essence, n'ont pas été considérées. L'effet induit sur le résultat global est cependant jugé négligeable.

L'usine d'éthanol est modélisée à partir de l'intrant '*methanol plant*'. Un facteur 2 a toutefois été introduit afin de tenir compte de la plus grande complexité du procédé de bioéthanol, par rapport à la production de méthanol fossile. La répartition entre les diverses étapes du procédé a été effectuée selon les coûts d'investissement respectifs. A noter que, de manière générale, la contribution de l'usine (machines et bâtiments) à la consommation globale d'énergie primaire non renouvelable relative à la production d'éthanol n'excède pas 1%.

L'installation de méthanisation est modélisée à partir de l'intrant « *wastewater treatment, class 4* ».

Les unités de stockage des matières premières et des co-produits ont été distingués de l'usine elle-même et pris en compte de manière spécifique.

L'approvisionnement en eau de l'usine d'éthanol est modélisé à l'aide de l'intrant '*tap water, at user*'. Les bâches de rétention d'eau sont modélisées au moyen de l'intrant '*water storage*'.

Le traitement des effluents liquides est modélisé au moyen de l'intrant '*treatment, sewage, to wastewater treatment, class 2*' pour le bio-éthanol et '*treatment, sewage, to wastewater treatment, class 4*' pour le biogaz, décrivant le traitement d'eaux de rejet au sein d'une

station d'épuration de classe 2 (71'100 EH en termes de charge polluante) et de classe 4 (700 EH) respectivement. L'intrant en question intègre l'ensemble des traitements anaérobie et aérobie, ainsi que l'élimination des boues et le rejet des effluents traités.

La production de chaleur au sein de l'usine de bioéthanol est modélisée au moyen de l'intrant '*heat, natural gas, at boiler condensing modulating > 100 kW*' tenant compte à la fois de la construction de la chaudière, de l'approvisionnement en gaz naturel et des émissions liées à la combustion de ce dernier.

La production de chaleur par le biogaz a été modélisée par l'intrant « *natural gas burned in a boiler <100 kW, non modulating* ». On rappelle que le biogaz est séché et épuré sur charbon actif avant usage.

La production de chaleur par le mazout dans la cas de la filière biogaz a été modélisé par les intrants « *light fuel oil burned in a boiler in boiler <100 kW , non modulating* » pour la chaudière de 150kW et « *light fuel oil burned in an industrial furnace 1 MW, non modulating* » pour la chaudière de 550kW.

L'intrant '*electricity, medium voltage, at grid*' a été considéré afin de décrire la consommation d'électricité tout au long du procédé. Sont prises en compte, dans cet intrant, la transformation du courant haute tension en moyenne tension, la transmission du courant moyenne tension, les pertes de transport ainsi que les émissions directes d'hexafluorure de soufre⁹ (SF₆). L'intrant retenu pour la production électrique correspond au mix d'approvisionnement de la Suisse en électricité, et affiche un rendement global de près de 50% (soit environ 2 MJ_p consommés par MJ_e produit). Pour information, il s'agit également de l'intrant utilisé dans la caractérisation de nombreux autres procédés décrits au sein de la base de données Ecolnvent pour le cas de la Suisse.

L'acheminement des diverses ressources consommées au cours du procédé (acide sulfurique, soude, nutriments, etc.), un transport par camion (28t) sur une distance de 100 km a été pris en compte, la distribution n'étant pas considérée dans les intrants initiaux d'Ecolnvent.

Concernant la formulation de l'essence₅, aucune dépense d'énergie particulière n'a été prise en compte pour le mélange de l'éthanol et de l'essence. Le stockage des carburants dans les entrepôts et à la station service a été modélisé au moyen de l'intrant '*regional distribution, oil products*', qui tient compte de l'infrastructure nécessaire pour les réservoirs et pour la station service.

En accord avec les valeurs précisées par Interis, le pouvoir calorifique du gaz naturel a été pris égal à 40.6 MJ/m³, pour une densité de 0.676 kg/m³ (soit 1.480 m³/kg). La chaleur massique de la vapeur est de 2.550 MJ/kg. Les densités respectives de l'éthanol et de l'essence sont de 0.795 et 0.743 kg/l. Si les densités de l'éthanol et de l'essence sont relativement proches, le pouvoir calorifique de l'éthanol (21.3 MJ/l) est en revanche sensiblement plus faible que celui de l'essence (32.0 MJ/l).

⁹ Le gaz SF₆ constitue un milieu diélectrique presque parfait, largement utilisé dans les équipements électrotechniques pour ses propriétés chimiques et physiques. Il s'agit cependant d'un gaz à effet de serre au potentiel très élevé (1 kg SF₆ équivaut à 32'400 kg CO₂ eq.). Jusqu'à présent, les études expérimentales n'ont pas révélé d'alternative intéressante.

ANNEXE 9 : CYCLE DE VIE DES CARBURANTS

Source : LASEN

Ce chapitre présente l'ensemble du cycle de vie des deux carburants retenus dans le cadre de cette étude (essence sans plomb 95 conventionnelle et essEnce_s). Dans une première section, la phase de production des carburants (jusqu'à la station service) est envisagée. La deuxième section s'intéresse ensuite à la phase dite d'utilisation des carburants, à savoir leur combustion dans le moteur d'un véhicule de référence, et propose un bref récapitulatif des tests menés par l'EMPA dans le cadre de l'étude Alcosuisse 2002 et des résultats obtenus.

Phase de production des carburants

La phase dite de production et de mise à disposition des carburants envisagés dans cette étude comprend l'ensemble des étapes de la chaîne de production jusqu'à la distribution dans les stations services. Ce chapitre, essentiellement descriptif, vise à établir pour chacune des filières envisagées, un inventaire des ressources consommées et des émissions polluantes occasionnées tout au long de la chaîne de production jusqu'à la station service. Cet inventaire permettra ainsi par la suite l'évaluation des émissions globales puis des impacts.

Dans chaque cas, l'inventaire des flux de masse et d'énergie sera présenté pour la production d'un litre de carburant. Par la suite, la comparaison des deux filières sera réalisée avec pour référence commune 100 km parcourus.

La filière "essence"

Dans le cas de l'essence conventionnelle, cette phase de production comprend en particulier l'exploration du sous-sol, l'extraction du pétrole brut, le raffinage (en Suisse ou à l'étranger) ainsi que toutes les étapes de transport liées à l'acheminement du brut ou du carburant raffiné jusqu'en Suisse, et enfin la distribution auprès des stations service. L'approvisionnement de la Suisse en produits pétroliers est représenté sur la figure 9.1. La distribution actuelle d'essence en Suisse peut être résumée de la manière suivante (24) :

- ♦ Importation de pétrole brut, production dans les raffineries de Cressier et Collombey et stockage dans les entrepôts défiscalisés en raffinerie.
- ♦ Importation d'essence raffinée par bateau, train, camion ou pipeline, vers différents entrepôts défiscalisés d'importation, soit dans la région genevoise (ensemble 40%), dans la région bâloise (46%), dans le nord-est (8%) et le Tessin (6%) ; on précise que toute l'essence importée passe obligatoirement à un moment donné par les entrepôts défiscalisés d'importation.
- ♦ Transport depuis les divers entrepôts défiscalisés d'importation ou de raffinerie vers d'autres entrepôts défiscalisés ou directement dans les stations-service locales (la fiscalisation du carburant n'a lieu que lorsque le produit passe la frontière de la zone défiscalisée, matérialisée par le compteur par lequel passe le carburant vers le bras de chargement des camions).
- ♦ Stockage dans quelques 40 entrepôts défiscalisés.
- ♦ Distribution de l'essence depuis les entrepôts défiscalisés vers les stations services ou vers de petits entrepôts fiscalisés.

Au total, les carburants peuvent subir 6-10 transvasements avant de parvenir à l'utilisateur. En général, l'organisation des entrepôts, notamment ceux participant au stockage obligatoire, est complexe et intégrée et en fréquente restructuration. A la réception du carburant, il est à priori impossible de dire combien de temps celui-ci restera stocké (24).

Dans le cadre de l'étude, l'approvisionnement en essence est effectué à partir de la raffinerie de Cressier (Petroplus). La chaîne de production située en amont de la raffinerie (y compris le raffinage) n'est pas décrite ici. La base de donnée Ecolnvent 2000 propose en effet un intrant (un enregistrement) 'petrol, unleaded, at refinery, CH' reprenant toute la chaîne de production de l'essence jusqu'à la raffinerie, dans les conditions spécifiques à la Suisse. C'est cet intrant qui est ici utilisé. La filière essence en aval de la raffinerie (depuis la raffinerie jusqu'à la station service) est décrite de la manière suivante :

- ♦ Transport depuis la raffinerie de Cressier jusqu'à l'un des 4 entrepôts envisagés dans cette étude (il est en effet prévu de mélanger l'éthanol à l'essence dans 4 entrepôts, et par souci de cohérence, les mêmes entrepôts sont envisagés pour la filière essence). Les entrepôts en question se situent à Cressier même (0 km), à Niederhasli (140 km), Rothenburg (120 km) et Birsfelden (110 km). L'essence est acheminée par train, à parts égales, vers chacun de ces centres de stockage. La distance moyenne parcourue est de 92.5 km. Par manque d'information, les étapes de chargement/déchargement ne sont pas prises en compte dans cette étude. L'effet est cependant jugé négligeable au niveau de la comparaison des filières car l'erreur vaut pour les deux filières.
- ♦ Stockage dans les entrepôts de Cressier, Niederhasli, Rothenburg et Birsfelden. Les durées de stockage ne sont pas précisées, et n'interviennent pas en termes d'ACV (seuls comptent les volumes de stockage, et l'analyse étant faite ici pour 1 litre, le volume stocké est pris égal à un litre).
- ♦ Transport depuis les entrepôts jusqu'aux stations service locales. Le transport est ici envisagé par camion (28t), sur une distance moyenne de 30 km. Là encore, les étapes de chargement/déchargement ne sont pas prises en compte dans l'analyse.
- ♦ Vente du carburant.

La filière "essence₅"

La filière essence₅ est sensiblement identique, du point de vue de la distribution, à la filière essence. Il est envisagé, dans le cadre de l'étude, que l'éthanol est mélangé à l'essence dans les entrepôts de Cressier, Niederhasli, Rothenburg et Birsfelden. Avant son acheminement vers les entrepôts, l'éthanol doit cependant être dénaturé. Une mise en œuvre généralisée de l'essence₅ en Suisse impliquerait en effet des transports de grandes quantités d'éthanol d'un petit nombre de sources (lieux de production et points d'entrée en Suisse d'éthanol importé) vers un grand nombre de destinations (raffineries et entrepôts de carburants). Afin de garder ces mouvements sous contrôle, la Régie Fédérale des Alcools (RFA) prévoit une dénaturation "à la source" de l'éthanol-carburant, qu'il soit produit en Suisse ou importé. La dénaturation est effectuée par adjonction de 1% (vol.) d'essence dans l'éthanol anhydre (24).

Le transport du bio-éthanol dénaturé jusqu'aux entrepôts de carburants est envisagé par train. Les distances séparant l'usine d'éthanol des entrepôts ont été fixées à 70 km pour Cressier, 120 km pour Niederhasli, 100 km pour Rothenburg et 40 km pour Birsfelden. La distance moyenne parcourue est de 82.5 km. En résumé, on transporte donc 0.05 litres d'éthanol par train sur 82.5 km et 0.95 litres d'essence par train sur 92.5 km. Les étapes suivantes (stockage, transport jusqu'à la station service et enfin stockage à la station service) sont identiques, aux densités près (Tableau 9), à la filière essence conventionnelle.

Phase d'utilisation des carburants

Dans le cadre de la présente étude, l'utilisation de l'éthanol-carburant se limite à l'essence₅. Les caractéristiques des deux carburants envisagés sont reprises dans le tableau 9.1.

Tableau 9.1 – Caractéristiques des carburants envisagés

Carburants	Description du carburant	PCI (MJ/l)	Densité (kg/l)
essence	essence sans plomb 95 conventionnelle	32.025	0.7427
essence ₅	95% (vol.) essence / 5% (vol.) éthanol	31.489	0.7542

Les données relatives à la phase d'utilisation des carburants étudiés reposent sur des mesures d'émissions réalisées par l'EMPA, sur un véhicule de référence (tableau 9.2), dans le cadre du projet Alcosuisse, au cours de l'année 2002 (25).

Tableau 9.2 – Caractérisation du véhicule de référence

Véhicule	FORD Focus
Norme	Euro III
Cylindrée	1'596 cm ³
Poids	1'060 kg
Carburants	essence / essence ₅
Cycles de conduite ¹⁰	ECE / EUDC / NEFZ

Le **cycle de conduite** retenu pour l'analyse de cycle de vie est indiqué en caractère gras. Il s'agit du cycle NEFZ (Neue Europäische Fahr-Zyklus) qui constitue actuellement la référence en termes de cycles de conduites, du fait qu'il est le plus représentatif du mode de conduite moyen des véhicules envisagés.

Le tableau 9.3 propose un bref résumé des mesures les plus significatives pour cette étude, réalisées par l'EMPA sur la FORD Focus avec l'essence et l'essence₅.

Tableau 9.3 – Résultats des mesures réalisées sur la FORD Focus avec l'essence et l'essence₅

Grandeur mesurée	Carburant essence	Carburant essence ₅
Emissions (g/km)		
CO ₂	164.630	162.380
CO	000.273	000.251
CH ₄	000.050	000.049
NO _x	000.056	000.064
SO _x	-	-
Consommation spécifique (l/100 km)	007.033	006.966

¹⁰ ECE, Economic Commission for Europe
EUDC, Extra-Urban Driving Cycle
NEFZ, Neue Europäische Fahr-Zyklus

Les consommations spécifiques mesurées avec l'essence et l'essence₅ permettront au moment de la présentation des résultats de l'ACV, d'exprimer les impacts par rapport à une distance parcourue (ici 100 km), plutôt que par litre de carburant consommé. Selon les résultats de l'EMPA, en effet, un litre d'essence₅ permet de couvrir une distance plus grande qu'un litre d'essence sans plomb conventionnelle. Ainsi, si l'on exprimait les résultats de l'ACV par litre de carburant consommé plutôt qu'en référence à distance parcourue, on occulterait un élément essentiel du problème : la prestation (et la fonction même) du système 'carburant-véhicule'.

G. BIBLIOGRAPHIE

- 1 « Productions animales » du 7 Novembre 2003
- 2 Bleiker U. ; Guntern U. ; Rentsch W. ; Unternäher R. ; Hagenbuch S. ; Raaflaub M. , Transformation du lait dans les régions périphériques – Solutions pour la mise en valeur du petit-lait. Rapport de Projet du Groupement Suisse pour les régions de montagne et de la Fédération des Producteurs Suisses de Lait , 2002
- 3 LASEN ; Etude comparative de carburants par analyse de leur cycle de vie. Rapport No. 415.105, établi par le Laboratoire de Systèmes Energétiques (LASEN) de l'EPFL, pour Alcosuisse, Centre de profit de la Régie Fédérale des Alcools, Copyright Alcosuisse, 2002.
- 4 Canovas-Diaz M. ; Howell J.A. , Stability of a percolating anaerobic downflow fixed film reactor under overloading conditions, Biotechnology Letters, 1986, 8 (5); 379-384
- 5 Koepp-Bank H.J. ; Geller A., Anaerobic digestion of cheese whey in different attached biomass digesters, European Congress Biotechnology, 1987, 1, 159-162
- 6 Zellner G. ; Vogel P. ; Kneifel H.; Winter J.; Anaerobic digestion of whey and whey permeate with suspended and immobilized complex and defined consortia, Applied Microbiology and Biotechnology, 1987, 27, 306-314
- 7 Patel P. ; Desai M. ; Madamwar D. ; Biomethanation of cheese whey using anaerobic upflow fixed film reactor ; Journal of Fermentation and Bioengineering, 1995, 79 (4), 398-399
- 8 Malaspina F. ; Cellamare C.M. ; Stante L. ; Tilche A. , Anaerobic treatment of cheese whey with a downflow-upflow hybrid reactor; Bioresource Technology, 1996, 55, 131-139
- 9 Hickey R.F. ; Wu W.M. ; Veiga M.C. ; Jones R. , Start-up, operation, monitoring and control of high rate anaerobic treatment systems, Water Science and Technology; 1991; 24 (8), 207-255
- 10 Yilmazer G. ; Yenigün O., Two-phase anaerobic treatment of cheese whey, Water Science and Technology, 1999, 40 (1), 289-295
- 11 Moletta R. , Gestion des problèmes environnementaux dans les industries agroalimentaires , Ed. Technique et Documentation , Paris (FR) , 2002
- 12 La méthanisation miniaturisée – Résultats de l'essai pilote pour le traitement des effluents de la laiterie de Nans-sous-Ste-Anne, publication de l'ARITT, Besançon (FR), 2000
- 13 Rehberger B., Thomet A, Wyss B. & Bisig W., Nanofiltration, Schlüsseltechnologie zur Verwertung von Nebenprodukten. In Deutsche Milchwirtschaft, 2003, 18, 65-774.
- 14 Rehberger B., Thomet A., Wyss B. & Bisig W. (2004). Obtention de sirop de sucre à partir de perméat d'ultrafiltration. In Lebensmittel-Technologie, 2004, 37.
- 15 FAM (2003). Neue Milchprodukte dank Membrantrenntechnik. Auteurs: Thomet A., Gallmann P. FAM-INFO No. 453, avril 2003

-
- 16 Planair SA, Développement d'une filière de carburant au bioéthanol : Rapport final de la phase d'investigations. Rapport établi par PLANAIR SA Bureau d'ingénieurs SIA, pour Alcosuisse, Centre de profit de la Régie Fédérale des Alcools, Copyright Alcosuisse, 2002.
 - 17 Maguin Interis, Etude budgétaire pour une unité de production d'alcool carburant à partir de petit-lait. Rapport 2270C-DE-01 établi par Maguin Interis, pour Alcosuisse, Centre de profit de la Régie Fédérale des Alcools, Copyright Alcosuisse, 2002.
 - 18 ISO/FDIS 14040 on Environmental Management, Life cycle assessment : Principles and framework, prepared by the Technical Committee ISO/TC 207 & Sub-committee SC5, Environmental Management, 1997.
 - 19 Jolliet O., Crettaz P., Analyse environnementale du cycle de vie : De la critique à la réalisation d'un écobilan, Ecobilan en ingénierie et management de l'environnement, Presses Polytechniques Universitaires Romandes (PPUR), 2000.
 - 20 Pré Consultants BV, Eco-Indicator 99 : A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment (Methodology Report), Amersfoort (B), 1999.
 - 21 RWB Eau et Environnement SA, Unité de production multi-matières premières : Traitement des effluents, Etude préliminaire. Rapport établi par RWB Eau et Environnement SA, pour Alcosuisse, Centre de profit de la Régie Fédérale des Alcools, Copyright Alcosuisse, 2004
 - 22 Helbling Ingenieurunternehmung AG, Assessment inkl. Rentabilitätsberechnung im Projekt "Bioethanol für Treibstoffe", Rapport No. 30350'00 MOR Bioethanol, établi par Helbling Ingenieurunternehmung AG, pour Alcosuisse, Centre de profit de la Régie Fédérale des Alcools, Copyright Alcosuisse 2002.
 - 23 Wooley R., et al., Lignocellulosic biomass to ethanol process design and economics utilizing co-current dilute acid prehydrolysis and enzymatic hydrolysis current and futuristic scenarios, Biotechnology Center for Fuels and Chemicals, National Renewable Energy Laboratory, US DOE, Golden CO (USA), 1999
 - 24 Planair SA, Etapes de développement du projet Etha+® 2004-2012 : Scénario de référence. Document établi à l'attention de la Direction Générale des Douanes. Rapport établi par PLANAIR SA Bureau d'ingénieurs SIA, pour Alcosuisse, Centre de profit de la Régie Fédérale des Alcools, Confidentiel, Copyright Alcosuisse, 2003.
 - 25 EMPA, Bio-Ethanol Projekt : Untersuchungen hinsichtlich des Emissionsverhaltens an einem Nutzfahrzeug und zwei Personenfahrzeugen, Rapport de recherche n° 202 672, Dubendorf (CH), 2002