

DE L'ANALYSE ET LA GESTION DES FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE A L'ECOCONCEPTION

VERSION 2.0 DECEMBRE 2008

AGID – Analyse et Gestion Intégrées et Durables des flux de matières et
d'énergie en entreprise

Editeur: Enrico BENETTO

Auteurs (en ordre alphabétique): Enrico BENETTO, Alexandre BERTRAND, Julien CARTON, Paula HILD, Colin JURY, Mario PLATTES, Mathieu ROUZEYRE, Joëlle WELFRING, François ZIMMERMANN

Revue critique: Pol SCHOSSELER



Project co-financed by
the European Union

Table de matières

Glossaire		3
1	Introduction et objectifs	4
2	Analyse et Gestion des Flux de Matière et Énergie	5
2.1	Objectifs	5
2.2	Méthodologie	5
2.3	Valeur ajoutée pour l'entreprise	6
2.4	Exemple: gestion des flux de tungstène	6
2.5	Exemple: Récupération d'énergie lors de la régénération de catalyseurs	8
3	Analyse exergétique	11
3.1	Objectifs	11
3.2	Méthodologie	11
3.3	Valeur ajoutée pour l'entreprise	13
3.4	Exemple: rendement exergétique du chauffage de l'air	13
4	Analyse émergétique	14
4.1	Objectifs	14
4.2	Méthodologie	15
4.3	Valeur ajoutée pour l'entreprise	15
4.4	Exemple: analyse émergétique de la production de biogaz	15
5	Analyse du Cycle de Vie (ACV)	18
5.1	Objectifs	18
5.2	Méthodologie	18
5.3	Valeur ajoutée pour l'entreprise	19
5.4	Exemple: ACV de l'utilisation de biogaz pour la cogénération et le transport	20
6	Eco-conception	24
6.1	Objectifs	24
6.2	Méthodologie	24
6.3	Valeur ajoutée pour l'entreprise	25
6.4	Exemple: Éco-conception d'un matériau bio-polymère multicouche	26
7	Conclusions	28
Références		29

Glossaire

ACV	Analyse du Cycle de Vie
AFME	Analyse de Flux de Matière et d'Énergie
AGID	Analyse et Gestion Intégrées et Durables des Flux de Matières et d'Énergie en Entreprise
CHP	Combined Heat and Power plant (unité de production combinée de chaleur et d'électricité)
CML	Centrum voor Milieukunde Leiden
Co	Kobalt
COP	Coefficient Of Performance (coefficient de performance)
CRP	Centre de Recherche Publique
CRTE	Centre de Ressources des Technologies pour l'Environnement
FEDER	Fond Européen de Développement Régional
ISO	International Standard Organisation
LU	Diminutif de « Luxembourg »
MCESR	Ministère de la Culture de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (LU)
MECO	Ministère de l'Économie et du Commerce extérieur (LU)
MWe	Méga Watt d'électricité
Nm ³	Normal-mètre cube
PET	polyéthylène
PLA	Polylactic acid / polylactide (acide polylactique)
ppm	partie par million
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
ROI	Return on Investment
Σ	somme
sej	Solar Embodied Joule
VALMAT	Valorisation des Matériaux
W	tungstène

1 Introduction et objectifs

AUTEUR : ENRICO BENETTO

Le projet AGID a permis d'introduire et de développer le concept de gestion durable des flux de matière et d'énergie dans les petites et moyennes entreprises (PME) localisées dans la zone « Objectif 2 » au Luxembourg.

Différentes techniques et outils ont été appliqués et développés dans le cadre de problématiques industrielles complexes et/ou de sous projets de recherche. Les résultats sont détaillés dans les rapports finaux des prestations de service et des projets de recherche. Or, l'amélioration des performances environnementales des produits et des procédés industriels implique l'adoption d'approches et d'outils répondant à des questions très différentes, qui pourraient être classés en trois types :

- Comment réduire la consommation de matières premières et d'énergie et la production de déchets ? Comment identifier et promouvoir des cycles fermés ? Comment tracer les pertes ?
- Comment évaluer l'efficacité (aussi du point de vue environnemental) d'un système de production ?
- Comment évaluer les impacts environnementaux engendrés par le produit ou le procédé ?

Ces trois classes de questions fondamentales peuvent s'appliquer :

- A une étape du cycle de vie d'un produit ou d'un procédé, en général l'étape de production pour le premier et celle de fonctionnement pour le second,
- A tout le cycle de vie du produit ou du procédé, y compris à la phase de conception.

Loin d'être exhaustive et parfaitement cohérente, cette première tentative de structuration de la problématique permet néanmoins de situer les différents outils utilisés par le CRTE dans les prestations de service et les projets de recherche par rapport à leurs objectifs et limites d'applications. Cela permet aussi d'avoir une vision unitaire des problématiques visées et des résultats obtenus.

A partir de cette structuration, le but de ce rapport est de présenter un certain nombre d'outils et de techniques utilisés, en précisant leurs objectifs, la méthodologie d'application, la valeur ajoutée apportée à l'entreprise. Un exemple d'application de chaque outil est aussi présenté. Les opportunités et les besoins de recherche, qui pourraient faire l'objet d'une suite du projet AGID, sont ainsi implicitement identifiés.

2 Analyse et Gestion des Flux de Matière et Energie

AUTEURS : ENRICO BENETTO (§2.1, §2.2, §2.3)

ALEXANDRE BERTRAND, MARIO PLATTES, JOËLLE WELFRING, FRANCOIS ZIMMERMANN (§2.4)

ENRICO BENETTO, ALEXANDRE BERTRAND, MATHIEU ROUZEYRE (§2.5)

2.1 Objectifs

L'analyse des flux de matière et d'énergie (AFME) consiste à réaliser un bilan des flux de matière et d'énergie traversant un système donné (par exemple un territoire, une entreprise, un procédé) sur une période de temps définie. Généralement on réalise une AFME dans le but d'identifier des pistes d'amélioration des performances au sein du système étudié ou des synergies éco-industrielles entre différents acteurs économiques, en terme d'échanges de flux (déchets, énergie, etc.). L'amélioration des performances peut consister en la réduction de la demande énergétique et/ou des matières premières consommées, dans une meilleure gestion des déchets, dans une augmentation de la productivité, etc. La recherche de synergies nécessite d'étudier plus finement les opportunités de mutualisation ou de valorisation des flux en fonction de leurs caractéristiques.

2.2 Méthodologie

Une AFME se concrétise généralement dans une représentation graphique et chiffrée du système étudié. Les flux de matière et d'énergie sont quantifiés à l'aide d'un modèle (simplifié) du système, réalisé à l'aide d'un outil informatique. Dans le cadre d'AGID, l'outil Umberto®¹ a été utilisé.

Le modèle se construit à partir des opérations unitaires qui constituent le système. Par exemple, dans le cas d'une entreprise, cela implique la quantification et la représentation pour chaque processus concerné des flux (Figure 1):

- de matière, en termes de consommation de matières premières, rejets de polluants, d'eaux usées et de déchets solides,
- d'énergie, en termes de quantités de chaleur et d'électricité consommée.

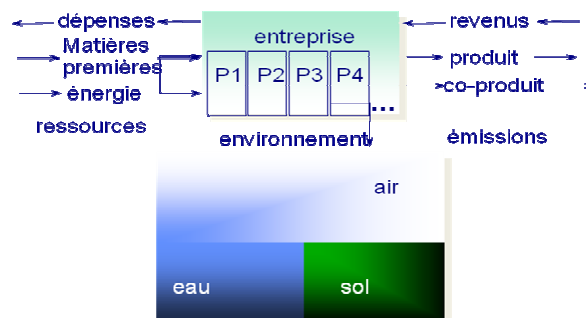


Figure 1 Flux de matière, d'énergie et flux monétaires généralement considérés dans une AFME

A ce stade on constate souvent que la notion de déchet est subjective. Tout déchet peut potentiellement être une ressource pour une entreprise tierce. Par exemple, la

¹ www.umberto.de

vapeur d'eau rejetée par une entreprise (déchet) peut servir à en chauffer une autre (ressource).

Les flux monétaires (revenus et dépenses) sont souvent quantifiés car étroitement liés aux flux de matière et d'énergie. Néanmoins une AFME est bien plus puissante qu'une simple analyse des flux monétaires qui peut contenir des hypothèses faussées, par exemple : l'air est gratuit, l'eau est une ressource illimitée, les écosystèmes ont une faculté d'autoépuration illimitée, les émissions inférieures aux valeurs limites sont sans danger, etc.

Une fois les flux de matière et d'énergie quantifiés et représentés, des solutions d'amélioration sont recherchées, afin de parvenir à une gestion des flux strictement adaptées aux besoins de l'entreprise, évitant ainsi des pertes inutiles. Ces solutions sont ensuite comparées entre elles selon des critères de faisabilité technique, d'analyse coûts-bénéfices et environnementaux.

L'AFME permet d'aboutir à :

- une représentation et gestion des flux de matière et d'énergie à différentes échelles (de l'opération unitaire d'un process au cycle de vie du process),
- des solutions optimales de gestion des flux,
- une analyse technico-économique et environnementale des solutions envisagées.

Les solutions retenues permettent de réduire les impacts environnementaux du système étudié. Néanmoins, l'AFME ne comprend pas une évaluation exhaustive des impacts environnementaux.

2.3 Valeur ajoutée pour l'entreprise

Les résultats d'une AFME, telle qu'elle a été présentée ci-dessus, permettent à l'entreprise de:

- identifier des pertes de matière et d'énergie méconnues ou sous-estimées auparavant,
- réduire les consommations de matières premières et/ou d'énergie et ainsi les coûts associés,
- identifier les flux ayant une incidence économique très importante,
- avoir une vision holistique sur ces processus, et notamment d'identifier de possibles synergies (échanges de matière ou d'énergie) entre processus, qui n'étaient pas évidentes auparavant.

2.4 Exemple: gestion des flux de tungstène

Cerazit S.A. est leader mondial dans la production de produits en matériaux durs pour le secteur automobile, le génie mécanique, l'industrie pétrolière, etc. Les produits à base de carbure de tungstène et de cobalt en poudre engendrent la production d'eaux usées riches en métaux lourds, notamment tungstène (W) et cobalt (Co) sous différentes spéciations chimiques. Les limites réglementaires d'émission, 2 ppm pour le W et 0,5 ppm pour le Co, sont très strictes et ont été imposées afin de limiter les effets négatifs de ces métaux sur la flore bactérienne des stations d'épurations. De

plus, la quantité d'eaux usées déchargées dans les égouts doit également être réduite.

A partir de la quantité de tungstène contenue dans les eaux usées (maximum 720 ppm), un procédé de précipitation, coagulation et floculation (P/C/F) par chlorure ferrique a fait l'objet d'une analyse des flux de matière. Un modèle du process a été réalisé à l'aide du logiciel Umberto. Les flux d'eaux usées et les flux de Co et W ainsi calculés sont illustrées respectivement par les diagrammes de type Sankey de la Figure 2 et de la Figure 3. Dans ces diagrammes, les carrés (T1, T2, ...) représentent des réactions, des opérations unitaires, des transformations de matière et/ou d'énergie. Les ronds (P1, P2, ...) peuvent contenir des entrants (matière et énergie, en vert), des sortants (en rouge) ou agir en tant que connexion entre deux transitions (en grisé).

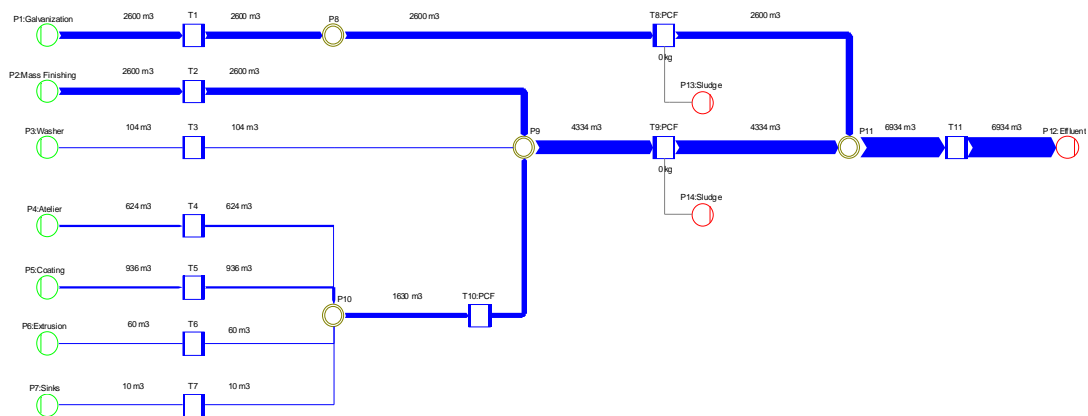


Figure 2 : flux d'eaux usées [m³ par an]

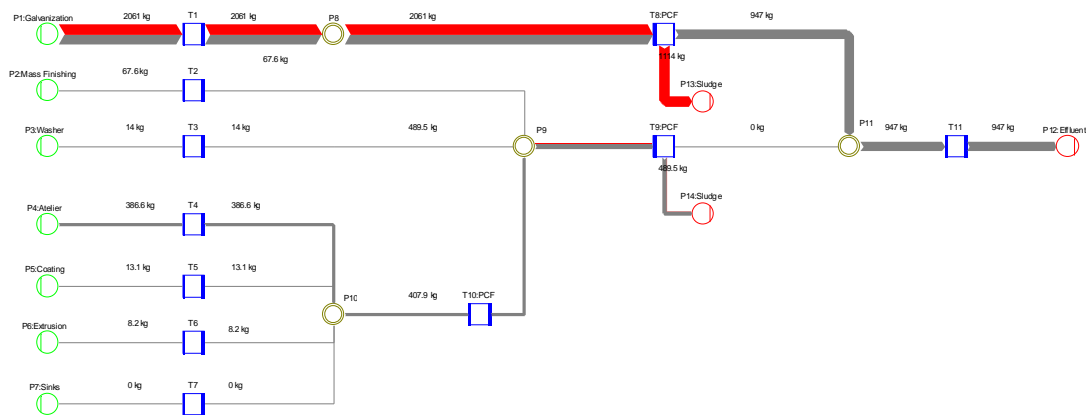


Figure 3 : flux initiaux de tungstène (gris) et cobalt (rouge) [kg par an]

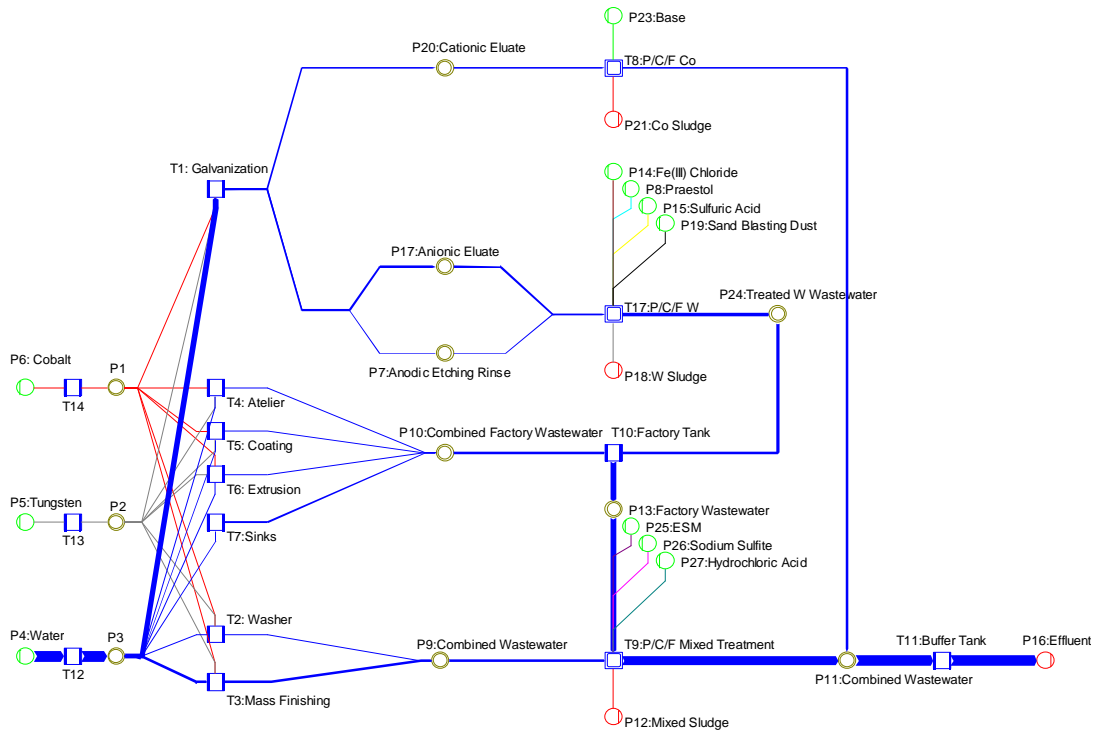


Figure 4 : flux de matières après la mise en place du traitement P/C/F

Parmi toutes les sources (P1-P7), le flux de matière le plus important provient de l'unité de galvanisation (P1). Les eaux usées qui proviennent de cette unité sont diluées avec les autres flux du site et le flux de W n'est pas traité. La concentration de W dans l'effluent final est estimée à 135 ppm, à savoir bien au-delà de la limite normative de 2 ppm.

Après optimisation, les flux anioniques et cationiques provenant de l'unité de galvanisation sont désormais traités séparément dans deux procédés de P/C/F (Figure 4, T8 et T17). Un troisième procédé de P/C/F (T9) permet de traiter les eaux usées restantes. Les procédés sont modélisés à l'aide de „sous réseaux“ qui prennent en compte l'ajout des produits chimiques nécessaires (floculant, solutions acides et basiques). Le traitement de l'éluat cationique contenant du Co nécessite l'ajout d'une solution basique (P23).

Après traitement de l'éluat anionique, la concentration résiduelle de tungstène dans les eaux usées en sortie du process est inférieure à 10 ppm, alors que la concentration de Co ne change pas. La valeur limite réglementaire de 2 ppm ne peut pas être atteinte à cause des limites technologiques. Le système de traitement permet toutefois de réduire de 97% les émissions de W.

L'optimisation et le contrôle du système peuvent être ultérieurement améliorés afin de stabiliser la concentration résiduelle de W et de réduire la quantité d'eaux usées rejetées. L'analyse des processus qui produisent les eaux usées et la mise au point d'approches et de technologies de production propre peuvent contribuer à limiter ultérieurement les émissions et ainsi les impacts environnementaux associés.

2.5 Exemple: Récupération d'énergie lors de la régénération de catalyseurs

Catalyst Recovery Europe S.A. est leader dans la régénération de catalyseurs provenant de l'industrie pétrochimique. Le processus de régénération des catalyseurs (Figure 5) comprend deux réacteurs, l'Opticat et le Régénérateur. Dans le premier, le catalyseur entre en contact avec de l'air préchauffé afin de vaporiser l'eau et les hydrocarbures et de démarrer l'oxydation du carbone et du soufre. Les hydrocarbures sont ensuite oxydés à l'aide de brûleurs. Le régénérateur permet d'achever l'oxydation du C et du S. Les fumées provenant des deux réacteurs sont ensuite traitées dans une chambre de postcombustion, afin d'achever l'oxydation des composés organiques éventuellement restants. Par la suite, les fumées sont refroidies à 220°C à l'aide d'une tour de refroidissement, avant d'être traitées dans un filtre à manches (séparation des poussières) et un scrubber (séparation et oxydation du SO₂).

Ce process engendre une consommation très importante de gaz naturel au niveau des brûleurs (environ 200 Nm³/h), d'eau de refroidissement (1 m³/h), et des coûts et impacts environnementaux conséquents.

L'objectif de l'Analyse des Flux d'Énergie est de réduire les impacts environnementaux (en conformité avec le système ISO 14001) à travers la réduction des consommations de gaz naturel et d'eau, tout en réduisant les coûts d'exploitation.

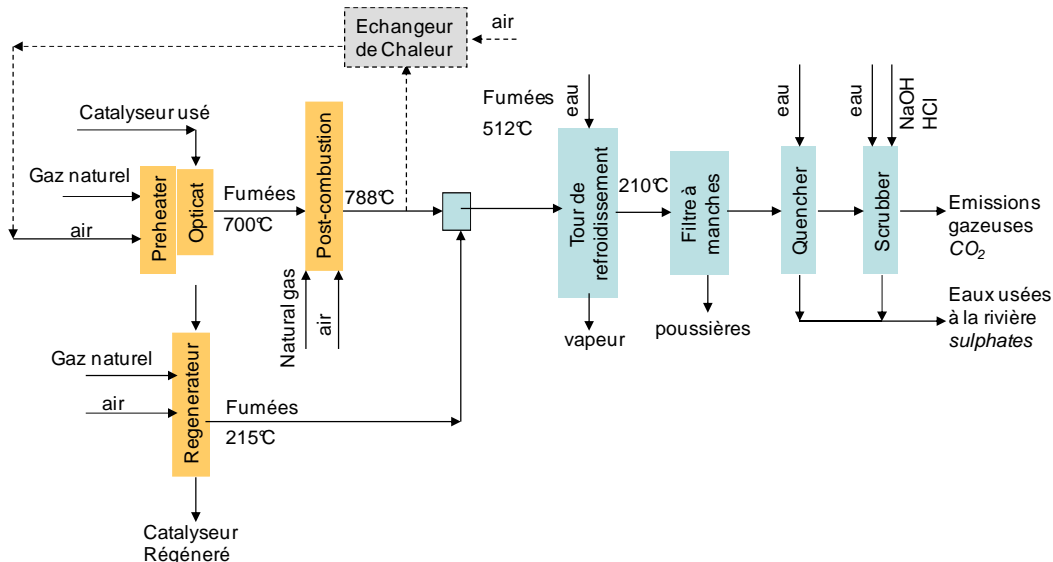


Figure 5 : Processus de régénération de catalyseurs avec récupération d'énergie (en pointillé).

L'analyse a permis d'évaluer les flux d'énergie du process et de mettre au point une solution de récupération de chaleur par le moyen d'un échangeur de chaleur. Cet échangeur se trouve à la sortie de la chambre de post combustion et permet d'utiliser la chaleur des fumées de combustion pour préchauffer l'air de processus en entrée de l'Opticat.

La puissance ainsi récupérée est 518 kW, ce qui représente 58% de la puissance totale potentiellement récupérable (890 kW) calculée à partir de l'analyse des flux. Cette économie d'énergie permet de réduire la quantité de gaz consommée de 52,2 kg/h (440 000 Nm³/a), à 183,6 kg/h sans échangeur et 131,4 kg/h avec échangeur de chaleur. La quantité d'eau économisée dans la tour de refroidissement (grâce à la moindre température des gaz à refroidir) est de 3310 m³/a. L'analyse coûts-bénéfices

permet de quantifier les économies réalisées à plus de 500k€ sur la période 2006 à 2008, ce qui correspond à un temps de retour sur investissement de 2 ans et demi.

L'évaluation environnementale (par une approche d'Analyse du Cycle de Vie simplifiée) permet d'estimer la réduction des impacts environnementaux liés aux émissions polluantes sur le site industriel (de la combustion du gaz naturel) à 910 t CO₂ eq/an, à savoir 16% de l'effet de serre engendré par le process.

La réduction des impacts environnementaux du cycle de vie, liés à la mise à disposition du gaz naturel (comprenant les processus d'extraction, importation, etc.) s'élève à 1130 t de CO₂ eq/an, à savoir l'impact généré par 90 habitants équivalents européens pendant 1 an.

3 Analyse exergétique

AUTEUR : ALEXANDRE BERTRAND

„Thermodynamics is a funny subject. The first time you go through it, you don't understand it at all. The second time you go through it, you think you understand it, except for one or two small points. The third time you go through it, you know you don't understand it, but by that time you are so used to it, it doesn't bother you anymore”.

-Arnold Sommerfeld- physicien allemand, modifia le modèle atomique de Niels Bohr.

3.1 Objectifs

Comme on l'a vu dans l'exemple de gestion d'analyse des flux d'énergie, la consommation énergétique peut être un indicateur significatif de la performance d'un procédé. Ainsi l'efficacité peut généralement se calculer en comparant l'énergie utile obtenue à l'énergie consommée. L'intérêt de cette méthode est sa simplicité de calcul, ainsi que sa facilité de compréhension. Elle a cependant l'inconvénient de ne pas refléter l'aspect qualitatif des flux énergétiques. Ainsi, lors de l'analyse de ces flux, les différents types (électricité, vapeur, eau chaude, eau froide, air comprimé, etc.) sont considérés comme flux séparés car apparemment sans point commun². L'optimisation se fait uniquement sur ces flux séparés, empêchant ainsi de trouver une solution intégrée permettant une valorisation efficace de la totalité des flux du site considéré. De plus, l'analyse des flux énergétiques permet certes le calcul de rendements, mais ceux-ci ne fournissent pas d'indication quant aux irréversibilités (occasionnant les pertes) du procédé considéré.

Une possibilité de tenir compte de cet aspect qualitatif est de considérer non pas l'énergie d'un flux, mais bien son exergie. L'exergie est la partie « utile » de l'énergie, et sa destruction reflète l'irréversibilité (et donc le niveau de perfection) du système considéré. L'exergie d'un flux est définie comme étant le travail mécanique maximal pouvant être obtenu par rapport à des conditions de référence (p.ex. température, pression du flux par rapport aux conditions ambiantes etc.). Son utilisation comme outil d'analyse permet une comparaison plus correcte entre différents flux, ainsi que la détection du niveau d'irréversibilité d'un procédé ponctuel ([1]).

3.2 Méthodologie

Malgré le fait que l'exergie ne soit pas conservée (à l'opposé de l'énergie), l'analyse exergétique peut être cependant abordée comme une analyse de flux, c.-à-d. que la somme des flux sortant est égale à la somme des flux entrant :

$$\sum \dot{E}x_{in} = \sum (\dot{E}x_{out} + \dot{E}x_{loss}) \quad [kW]$$

Ainsi les flux exergétiques sortant seront toujours (sauf dans le cas de modèles théoriques réversibles) composés de flux « utiles » $\dot{E}x_{out}$ et de flux inutilisables $\dot{E}x_{loss}$. Plus ces pertes exergétiques sont élevées, plus le système est la cause d'irréversibilités, et

² L'exemple classique concernant cette difficulté se reflète dans le domaine du froid par compression. La performance du système se calcule par le ratio entre froid produit et l'électricité consommée. Les valeurs obtenues (le terme rendement est justement évité, l'on préfère le terme de Coefficient Of Performance - COP) se situent généralement entre 300 et 400%.

donc moins le système s'approche de son modèle parfait. L'optimisation du système devrait ainsi viser à réduire au maximum ces irréversibilités, de manière à ce que le ratio $\dot{E}x_{out}$ sur $\dot{E}x_{in}$ tende vers 1.

Les flux généraux $\dot{E}x_{in}$ et $\dot{E}x_{out}$ regroupent souvent plusieurs flux spécifiques d'exergie. Ces derniers dépendent du système considéré et peuvent être, selon les conditions ou leur importance, être négligés. Ainsi, il s'avère impératif, pour obtenir une analyse correcte, de définir les formes d'exergie à considérer avant de commencer la phase d'étude.

Les formes les plus souvent rencontrées dans les procédés classiques sont :

- L'exergie thermo-mécanique $\dot{E}x_{tm}$, qui tient compte de la variation d'enthalpie ($h-h_0$) et d'entropie ($s-s_0$), est définie par la température et la pression du fluide considéré. L'indice 0 se réfère au niveau de référence, généralement les conditions ambiantes (298,15 K ; 1,01325 bar)³

$$\dot{E}x_{tm} = \Sigma \dot{m}((h - h_0) - T_0(s - s_0)) \quad [\text{kW}]$$

Une des difficultés principales du calcul de l'exergie thermo-mécanique se situe dans son application à des fluides réels ainsi qu'à des mélanges de fluides réels dont les valeurs d'enthalpie et d'entropie ne sont pas connues. Les valeurs de s et h sont disponibles avec le logiciel gratuit « Coolpack »⁴

- L'exergie chimique $\dot{E}x_{ch}$, qui reflète l'exergie d'une réaction chimique. Le calcul de l'exergie chimique n'est pas clairement défini en littérature. Selon la littérature considérée, l'exergie de mélange peut également être considérée dans cette valeur.

A ces types d'exergie viennent s'ajouter l'exergie potentielle (liée à une différence de hauteur) et l'exergie cinétique (liée à une différence de vitesse), qui sont souvent négligeables par rapport aux deux premiers flux nommés, ainsi qu'à l'exergie électrique (qui correspond à l'énergie électrique), l'exergie nucléaire etc.

Une fois les différents flux déterminés, permettant ainsi le calcul des flux généraux $\dot{E}x_{in}$ et $\dot{E}x_{out}$, le rendement exergetique peut finalement être obtenu :

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}x_{out}}{\dot{E}x_{in}} \quad [\text{kW}]$$

Notons ici qu'il existe différentes versions de calcul de rendement exergetique, qui tiennent compte soit des flux effectivement valorisés, soit des flux valorisés et non-valorisés etc. ([2], p.14). Plus le rendement exergetique se rapproche de 100% et plus les irréversibilités (et donc les pertes) du système sont réduites.

Lors de calculs exergetiques, certains points doivent être considérés attentivement:

- Le calcul du rendement exergetique peut être faussé si des flux invariants d'exergie sont pris en compte. En effet, si la différence entre flux entrant et sor-

³ Voir [2]. p. 29 pour des plus amples détails sur le choix des conditions de références

⁴ <http://www.et.web.mek.dtu.dk/Coolpack/UK/>

tant est réduite par rapport à ces flux invariants, le rendement ne changera que très peu, ou même pas du tout, menant ainsi à des conclusions erronées.

- Les fluides réels ne se comportent plus comme fluide parfait si leur pression est trop élevée ou leur température trop basse. Une possibilité de vérifier leur comportement est de calculer le facteur de compressibilité, ou facteur d'imperfection, Z . Celui-ci tend vers 1 pour des fluides parfaits.
- L'analyse exergétique d'un procédé doit, selon le cas, être subdivisée en plusieurs parties. Par exemple, la combustion d'un gaz devra d'abord tenir compte de la perte en exergie suite au mélange de l'air et du carburant, pour seulement ensuite considérer la réaction de combustion. Un exemple d'analyse pour un système de cogénération est traité par [2] p. 270.

3.3 Valeur ajoutée pour l'entreprise

L'analyse exergétique permet d'optimiser les flux d'énergie en tenant compte de leur qualité ainsi que de l'irréversibilité des procédés considérés. Les solutions proposées permettent de comparer des flux de formes différentes quant à leur qualité, et ainsi de choisir le flux le mieux adapté, à savoir celui ayant le niveau exergétique nécessaire et présentant un degré d'irréversibilité réduit. Tout cela se traduit dans des investissements financiers optimisés, dans une réduction des coûts opérationnels et, quelque part, aussi dans une réduction des impacts environnementaux.

3.4 Exemple: rendement exergétique du chauffage de l'air

Considérons le cas d'un chauffage électrique utilisé pour chauffer un flux d'air de 100 kg/s de 25°C à 200°C (Tableau 1).

Tableau 1 : Données thermodynamique du flux d'air

Débit d'air	100 kg/s
Enthalpie avant chauffage	527,15 kJ/kg
Enthalpie après chauffage	704,93 kJ/kg
Entropie avant chauffage	3,94 kJ/kg*K
Entropie après chauffage	4,41 kJ/kg*K
Rendement du système électrique	100%
Energie de chauffage	4,94 kWh
Exergie du flux d'air entrant	0,00 kWh
Exergie du courant électrique	4,94 kWh
Exergie du flux d'air chauffé	1,06 kWh
Destruction d'exergie	3,88 kWh
Rendement exergétique	21%

Même en considérant un rendement de 100% pour le système de chauffage, l'analyse des flux d'exergie fournit un rendement exergétique de l'ordre de 21%. Il s'ensuit qu'il est plus intéressant d'utiliser le flux électrique directement que de l'utiliser pour la production d'air chaud. Autrement dit, le flux d'air chaud ne pourrait fournir que 21% du travail que pourrait potentiellement fournir le flux électrique.

4 Analyse émergétique

AUTEUR : COLIN JURY

4.1 Objectifs

Par rapport aux analyses énergétique et exergétique, l'analyse émergétique élargit les frontières de l'étude et prends en compte l'énergie dépensée par les processus naturels qui mettent à disposition les ressources primaires consommées (eau, pétrole, minerais, bois, etc.). Il apparaît logique lorsqu'un processus utilise du plastique que l'on prenne en compte l'énergie liée à la production du plastique. Il est donc cohérent lorsque l'on considère une ressource naturelle de compter l'énergie ultime qu'a fournie l'environnement pour sa mise à disposition.

L'analyse émergétique offre ainsi l'opportunité d'évaluer l'utilisation de certaines ressources, comme les ressources en eau ou la matière organique des sols, qui sont actuellement difficilement prises en compte par les autres méthodes ([3]).

Un autre avantage de l'analyse émergétique, une autre voie dans laquelle elle ouvre le champ de l'étude, est l'intégration des échanges économiques dans l'évaluation. Dans notre société, il est possible de relier la monnaie à un impact environnemental puisque la monnaie est-elle même reliée à la consommation de ressources qui génère l'impact ([4]). L'employé étant un rouage du système, son émergie doit être prise en compte dans le bilan. Cela pourrait se faire à travers l'émergie de son salaire qui représentera sa consommation et donc la mobilisation des systèmes naturels pour permettre et inciter l'être humain à fournir un travail.

Il est évident que l'analyse émergétique présente plusieurs intérêts, dont certains sont encore à explorer. Le principal avantage de cette méthode réside cependant dans le fait que le caractère durable (ou l'efficacité) du système étudié n'est plus déterminé par rapport à des facteurs subjectifs liés aux préoccupations humaines, comme c'est le cas dans l'analyse exergétique où l'on parle d'énergie utile. Au contraire, le facteur premier et incontournable qui est considéré est l'effort fourni par la nature. Plus cet effort sera important et plus grand sera le temps nécessaire au renouvellement de la ressource. En général l'effort de la nature augmente avec le nombre de processus requis, et donc aussi avec le temps ([4]). Par extension, plus le temps de renouvellement est long et plus le maintien de notre technologie, de notre niveau de vie, est difficile.

Du fait des incertitudes inhérentes aux méthodes d'évaluation macroscopiques [5], l'approche émergétique ne peut pas suffire à elle seule à l'analyse complète d'un système. Cependant, cette méthode permet d'apporter, à travers ses outils d'analyse [6], des informations indispensables à l'évaluation de l'efficacité et des impacts environnementaux d'un système. De plus, il reste encore à défricher et concrétiser l'utilisation de tout un pan de cette discipline qui consiste à évaluer non plus l'émergie des ressources utilisées, mais celle des polluants émis et à en déterminer des indicateurs de performance (LDI/PDI ; [7] ; émergie des écosystèmes ; [8]).

4.2 Méthodologie

Le terme émergie est une contraction de l'anglais « embodied energy ». L'émergie d'une ressource consiste en l'énergie dépensée par la chaîne de processus amont qui ont permis sa mise à disposition.

L'émergie est exprimée en „sej“ (Solar Embodied Joule). Cependant il existe trois sources d'énergie qui sont à la base de tous les processus physiques observés sur terre : le soleil, la chaleur terrestre et l'énergie des marées. La chaleur de la croûte terrestre et l'énergie des marées sont converties en „sej“ de façon à ne manipuler qu'une seule unité [4].

A partir de ces trois sources, l'énergie nécessaire au fonctionnement global de tous les processus terrestres est déterminée [4]. Après quoi, cette valeur est ramenée à une unité de référence (J, kg, m³...). Ce rapport est appelé « transformité » et est exprimé en sej/unit. Les transformités sont utilisées pour calculer l'émergie d'un système. Par exemple, chaque kilogramme de minerai de fer nécessaire pour un processus est multiplié par la transformité du fer (sej/kg) afin d'obtenir l'énergie totale dépensée depuis son émission par le manteau terrestre, jusqu'aux multiples facteurs et processus (érosion, cycle de l'eau, surrection, vent, etc.) le menant à une concentration suffisamment élevée pour être exploitable.

L'analyse émergétique consiste donc à construire un tableau regroupant tous les matériaux entrant et à les multiplier par leur transformité. Le tableau peut-être organisé de différentes façons pour calculer différents ratios qui permettront de faciliter l'interprétation des résultats. L'organisation du tableau dépendra aussi de la quantité et de la nature des informations.

4.3 Valeur ajoutée pour l'entreprise

La valeur ajoutée pour l'entreprise n'est pas directe comme elle peut l'être avec une optimisation de sa consommation énergétique et une réduction de ses dépenses induites par des analyses énergétiques ou exergétiques.

La valeur ajoutée se situe au niveau de la communication sur sa politique environnementale. L'entreprise peut ainsi mettre en évidence ses efforts vers une réelle durabilité environnementale. Une durabilité non pas d'un point de vue des préoccupations humaines, mais une réelle durabilité physique d'un point de vue de la nature.

Il est à noter, comme énoncé précédemment, que cette méthode se doit d'être complémentaire à, ou d'être complétée par, une autre méthode qui, elle, aura une valeur ajoutée dans un autre domaine (durabilité d'un point de vu de l'être humain).

4.4 Exemple: analyse émergétique de la production de biogaz

La production de biogaz par monofermentation sèche de plantes énergétiques et son injection dans le réseau de gaz naturel ont été étudiés dans le cadre du projet Lux-Cycle ([9]). Ce projet s'intègre dans les politiques européenne et luxembourgeoise de développement de carburants alternatifs afin de répondre aux objectifs du protocole de Kyoto ainsi qu'à l'accroissement de l'indépendance énergétique. Ce projet a été entièrement financé par l'Etat luxembourgeois (MCESR), le CRP Gabriel Lippmann et l'université du Luxembourg ayant à charge la partie technique et le CRP-Henri Tudor

(CRTE) la partie environnementale et la réalisation de l'Analyse du Cycle de Vie. Des partenaires privés ont fourni des informations complémentaires.

Sur la base de l'inventaire de données réalisé dans Luxcycle, les figures 6a et 6b ainsi que le Tableau 2 ont pu être établies dans le cadre du projet AGID.

Tableau 2 : Tableau d'analyse émergétique de la production de biogaz

Evaluation émergétique du biogaz à partir de la monofermentation de plantes énergétiques					
		Unité	Données (unité/ha/yr)	Transformité (sej/unit)	Emergy solaire (E13 sej/ha/yr)
Ressources renouvelables (RR)					
1	Soleil	J	3.1E+13	1.0E+00	3.1E+00
2	Eau utilisée par les plantes	J	2.8E+10	2.6E+04	7.3E+01
3	Eau utilisée par une turbine	J	9.0E+10	4.7E+04	4.2E+02
	Plus grande RR utilisée				4.2E+02
Ressources Non renouvelables (RNR)					
4	Perte nette de sol de surface	J	1.1E+09	1.2E+05	1.4E+01
5	Lignite	J	4.9E+09	6.7E+04	3.3E+01
6	Houille	J	7.8E+09	6.7E+04	5.2E+01
7	Grisou	J	1.8E+08	8.1E+04	1.4E+00
8	Gaz naturel	J	4.8E+10	8.1E+04	3.9E+02
9	Pétrole brut	J	4.3E+10	9.1E+04	3.9E+02
10	Tourbe	J	2.3E+05	3.2E+04	7.4E-04
11	Uranium	J	1.0E+10	3.0E+03	3.1E+00
12	Minerai	g	2.5E+06	1.7E+09	4.2E+02
	Total RNR				1.3E+03
	Total RR and RNR (Y)				1.7E+03
Transformité du biogaz					
13	Basée sur le pouvoir calorifique supérieur	J		7.7E+04	sej/J
14	Basée sur le pouvoir calorifique inférieur	J		8.5E+04	sej/J
Ratio					
15	Rendement émergétique (EYR)			Y/RNR	1.32
16	Contribution environnementale (ELR)			RNR/RR	3.10
17	Index de soutenabilité émergétique (EIS)			EYR/ELR	0.43

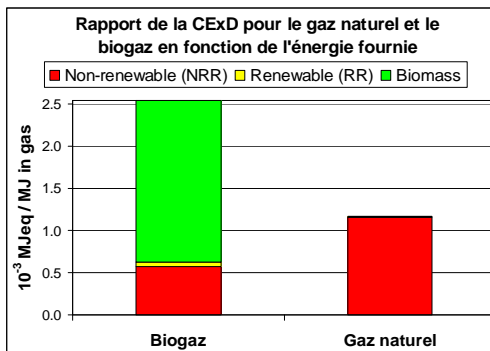


Figure 6a) Analyse exergétique

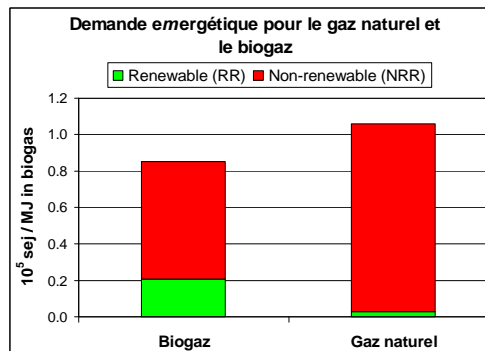


Figure 6b) Analyse émergétique

L'analyse des résultats a permis :

- de trancher, d'un point de vu émergétique, en faveur du biogaz puisqu'il montre une dépense énergétique totale moindre que le gaz naturel (figure 6b). Cela n'aurait pas été possible à partir de la seule analyse exergétique (figure 6a).
- de montrer que le processus de production de biogaz doit encore être optimisé pour rentabiliser l'énergie directement utilisable du système (figure 6a). Cela n'aurait pas été possible à partir de la seule analyse émergétique.

- d'éviter de considérer le biogaz comme une source d'énergie à fort potentiel de renouvelabilité. Seule, l'analyse exergetique l'aurait considérée comme relativement durable du fait d'un fort pourcentage (75%) d'énergie renouvelable, alors que l'analyse émergetique montre une proportion de seulement 25% d'énergie renouvelable.

Cette dernière conclusion montre à quel point il est important de considérer le système dans sa globalité. La renouvelabilité d'un système ne dépend pas seulement des contributions et des conceptions humaines, le tribut de la nature doit être pris en compte. Devant la problématique de la déplétion des sources d'énergie, la production de carburant de qualité comme le biogaz n'est en aucun cas une alternative suffisante. La réduction de la consommation doit passer avant, ou tout du moins être au même niveau que, la production de carburant de qualité puisque aucun processus ne saurait s'affranchir d'un important soutien direct ou indirect de la nature.

5 Analyse du Cycle de Vie (ACV)

AUTEURS : ENRICO BENETTO, COLIN JURY

5.1 Objectifs

L'analyse émergétique ambitionne de fournir un indicateur unique de durabilité environnementale d'un système, ou tout de même un indicateur agrégé de ses performances environnementales, en prenant en compte son cycle de vie. Cependant, les effets sur l'environnement sont très variés et affectent plusieurs aires de protection, à savoir le changement climatique, la santé humaine, la qualité des écosystèmes, les ressources, l'environnement anthropique (par exemple les bâtiments), etc. Il est difficile d'agréger ces effets dans un indicateur unique sans devoir considérer un système de pondération, autrement dit les préférences des décideurs. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), représente l'outil idéal d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit, d'un procédé ou d'un service le long de tout son cycle de vie. Le but de l'étude ACV est non seulement de caractériser la performance environnementale en vue d'aider les décideurs ou les consommateurs à choisir entre les différents processus ou produits rendant les mêmes fonctions, mais aussi de repérer les points contrôlant la pollution ou la consommation d'énergie afin d'orienter la recherche de solutions et, le cas échéant, de nouvelles technologies.

5.2 Méthodologie

L'ACV est normalisé par les normes de la série ISO 14040 et se structure dans les étapes suivantes:

Définition des objectifs et du champ de l'étude

Cette étape consiste à déterminer les personnes concernées par les résultats de l'étude, la fonction du produit ou du processus ainsi que les buts de l'étude (par exemple, comparer différents systèmes, déterminer les processus les plus polluants...). Tout cela permet de délimiter les frontières et le champ d'étude pour les étapes suivantes. Lors de la collecte des données il est possible de revoir les objectifs et la portée de l'étude en fonction des informations disponibles.

Inventaire

L'inventaire consiste à collecter les entrants (matières premières, énergie, surface...), les produits principaux rendus, les co-produits et les émissions de polluants (sous forme gazeuse, liquide ou solide) de tous les processus du cycle de vie. Les flux de même nature entrants et sortants des différents processus sont ensuite agrégés.

Evaluation des impacts

Il existe deux approches d'évaluation des impacts: l'approche orientée « problèmes », ou « midpoint », et l'approche orientée « dommages », « endpoint ».

La première approche procède à une classification des données inventoriées en catégories d'impact (effet de serre, acidification, etc.). Les résultats d'impact de chaque catégorie sont ensuite calculés par le biais de facteurs de caractérisation, qui évaluent la contribution de chaque substance à la catégorie d'impact. En pratique, cela correspond à ramener le potentiel d'une molécule pour un impact donné à celui

d'une molécule de référence. Par exemple, un kilogramme de méthane est équivalent, en termes d'accroissement de l'effet de serre, à 23 kg de CO₂. En procédant de cette manière tous les gaz à effet de serre du système sont exprimés en kilogramme de CO₂ équivalent (kg CO₂ eq). Des exemples de méthodes « midpoint » sont CML 2002 ([10]) et EDIP 2003 ([11]).

L'approche « dommages » va plus loin dans la chaîne de causes à effet. Elle considère les impacts sur l'être humain et l'écosystème ainsi que l'épuisement des ressources. Par exemple, l'effet de serre va entraîner une sécheresse accrue et donc un impact sur l'écosystème via une réduction de la disponibilité de l'eau. Ou bien, rendant plus difficile les cultures sur certaines régions du globe, la sécheresse induira des carences alimentaires portant atteintes à la santé humaine. La méthode Ecoindicator99 ([12]) est un exemple d'approche « endpoint ».

A mesure que l'on essaie d'évaluer les impacts sur les cibles ultimes, les incertitudes sur les résultats sont de plus en plus importantes. C'est pourquoi l'approche « midpoint » est généralement plus utilisée que l'approche « endpoint ». Ceci dit, l'intérêt pour des approches combinées «midpoint-endpoint» est toujours grandissant et elles sont donc de plus en plus conseillées. La méthode Impact2002+ ([3]) et la méthode ReCiPe (en cours de développement) en sont deux exemples.

Interprétation des résultats

Cette dernière étape englobe l'analyse et la vérification des résultats. L'étude menée permet alors, en toute connaissance des limites et des incertitudes, de démarquer les étapes du processus présidant aux différentes classes d'impacts étudiées. L'analyse de contribution des molécules aux différentes classes d'impact permet de déterminer les parties du système à améliorer. L'analyse de sensibilité permet de repérer quelles sont les données clefs du système pour lesquelles une variation, même petite, engendre une variation significative des résultats. L'analyse d'incertitude permet d'observer les variations de résultats en fonction des distributions de probabilités des données clefs du système. Ici aussi il s'agit de relever les faiblesses de l'étude relatives à la qualité ou la variabilité des données.

5.3 Valeur ajoutée pour l'entreprise

Les résultats de l'ACV permettent de disposer d'une information détaillée et exhaustive sur la performance environnementale des produits étudiés, obtenue à partir d'une méthodologie standardisée et scientifiquement fondée. Ils constituent ainsi une base pour le benchmarking de produit, la communication environnementale interne et externe, l'amélioration des processus.

L'ACV permet de démontrer un avantage compétitif d'un produit par rapport à un produit concurrent et d'identifier les possibilités d'amélioration le long de tout son cycle de vie.

Pour ces raisons, l'ACV est un outil de support de processus décisionnels qui est de plus en plus utilisé par les entreprises et les organismes publics. Plusieurs directives et politiques communautaires ont été définies à partir de résultats d'ACV ou en adoptant la démarche ACV, par exemple : l'écolabel européen, la directive 2005/32/EC en matière d'éco-conception applicables aux produits consommateurs d'énergie, le programme Environmental Technologies Action Plan (ETAP), la Politique Intégrée de Produit, etc. L'outil ACV est préconisé pour la vérification des performances environ-

nementales de nouvelles technologies, dans les schémas de vérification en cours de développement (par exemple projet TESTNET) et dans le 7^{ème} programme cadre de recherche et développement (FP7).

5.4 Exemple: ACV de l'utilisation de biogaz pour la cogénération et le transport

La méthode ACV est utilisée pour déterminer la compétitivité du biogaz étudié dans le projet « Luxcycle » (§4.4) en considérant deux types d'utilisation: (1) la combustion dans une centrale de cogénération de 1MWe (CHP 1MWe) et, (2) l'utilisation en tant que carburant pour voiture.

Dans les deux cas d'utilisation, le gaz produit par gazéification de bois et par fermentation de fumier et d'autres substrats (co-fermentation humide) sont utilisés comme base de comparaison. Pour la production d'électricité et de chaleur dans le scénario CHP 1MWe, l'huile de colza et le gaz naturel sont aussi considérés. Dans le deuxième scénario d'utilisation (carburant pour voiture), le carburant de référence est l'essence. L'éthanol produit à partir du sucre de betterave est aussi pris en compte.

Résultats pour la CHP 1MWe

Les résultats du scénario CHP 1MWe sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3: Les chiffres représentent le différentiel (en pourcentage) entre le dommage des carburants alternatifs par rapport au dommage du gaz naturel pour une utilisation dans une CHP 1MWe. Le code couleur montre la variation absolue entre les carburants alternatifs et le gaz naturel. L'unité est le « 10⁻⁶ point ». Rouge représente un accroissement du dommage > 10 unités ; Orange 10 > x > 5 ; Jaune 5 > x > 0 ; Vert claire représente une diminution 0 > x > 5 unités ; Vert foncé > 5. La méthode d'évaluation d'impacts utilisée est Impact 2002+ v2.1.

	Changement climatique	Qualité de l'écosystème	Santé humaine	Déplétion des ressources
Cofermentation	-52	201	80	-80
Monofermentation	-35	3173	89	-59
Gazéification	-73	907	26	-71
Huile de colza	131	6487	572	103

Concernant le dommage sur les ressources et l'impact sur le changement climatique, les trois types de gaz sont toujours plus performants que le gaz naturel. En revanche les dommages sur la qualité de l'écosystème et la santé humaine sont toujours plus importants pour les carburants alternatifs que pour le carburant fossile de référence

Comme tous les dommages sont exprimés en points⁵, il est possible de les agréger pour obtenir un score unique et ainsi faciliter la comparaison. Il faut alors pondérer les catégories de dommage en fonction de leur importance relative pour les décideurs. Toutes les pondérations possibles ont été prises en compte à l'aide de l'outil « Mixtri2 »⁶. Il est à noter que d'après ([12]), les pondérations des trois classes de dommage sont globalement toujours supérieures à 20%, ce qui est représenté par le petit triangle central qui délimite le domaine des jeux de pondération les plus probables sur les Figures 7 et 8.

⁵ Un point représente le dommage généré par un habitant européen moyen pendant l'année 2000

⁶ <http://www.doka.ch/EI99/mixtri.htm>

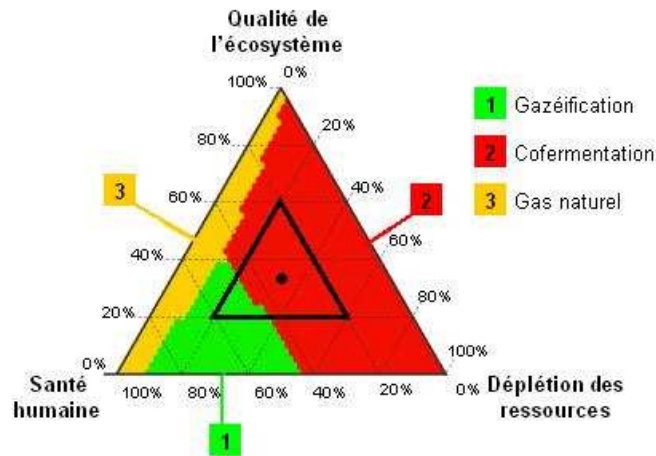


Figure 7 : Classement des carburants en fonction de leur dommage environnemental agrégé. Plus la surface est importante et plus grand est le nombre de pondérations pour lesquelles le carburant est préférable aux autres. I2002+ v2.1.

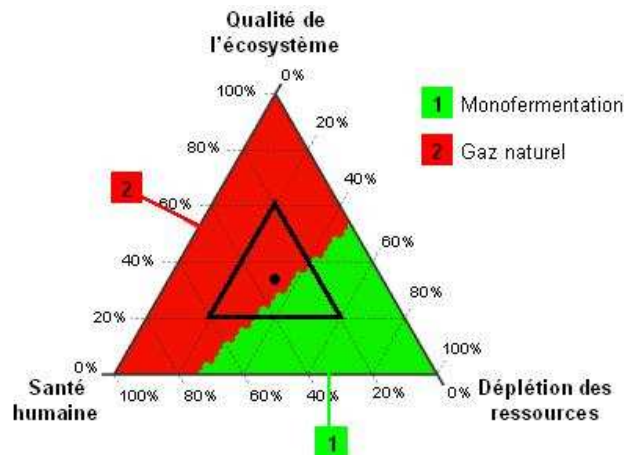


Figure 8 : Classement des carburants en fonction de leur dommage environnemental agrégé. Plus la surface est importante et plus grand est le nombre de pondérations pour lesquelles le carburant est préférable aux autres. I2002+ v2.1

La Figure 7 montre que la co-fermentation est la meilleure alternative puisque sa surface est la plus grande, notamment dans le petit triangle. Vient ensuite la gazéification puis le carburant fossile. Pour tous les ensembles de pondération observés, l'éthanol et la monofermentation sont toujours moins performants que les autres carburants et n'apparaissent donc pas.

En comparaison seulement avec le gaz naturel, la monofermentation n'est compétitive que si la pondération de la dépletion des ressources est supérieure à 40% (Figure 8). Il est à noter cependant que l'effet sur le changement climatique n'est pas pris en compte dans le score unique en utilisant la méthode I2002+ ([3]). Ce faisant la surface de prédominance du biogaz serait plus importante, mais cela est difficile à estimer.

Si le calcul est réalisé en utilisant la méthode d'évaluation des dommages EcoIndicator99 ([12]) les résultats sont relativement similaires bien que celle-ci intègre le changement climatique dans le dommage sur la santé humaine.

La conclusion est que la monofermentation ne peut être compétitive que si la déplétion des ressources et le réchauffement climatique deviennent des problématiques prioritaires pour les décideurs ou bien si le processus est fortement amélioré.

Résultats pour le transport

Les résultats du scénario de transport sont présentés dans le Tableau 4.

	Changement climatique	Qualité de l'écosystème	Santé humaine	Déplétion des ressources
Cofermentation	-37	246	18	-67
Monofermentation	-15	760	24	-36
Gazéification	-66	367	-14	-54
Ethanol	1	165	-20	2

Tableau 4 Les chiffres représentent le différentiel (en pourcentage) entre le dommage des carburants alternatifs par rapport au dommage du gaz naturel pour une utilisation comme transport. Le code couleur montre la variation absolue entre les carburants alternatifs et le gaz naturel. L'unité est le « 10⁻⁶ point ». Rouge représente un accroissement du dommage > 10 unités ; Orange 10 > x > 5 ; Jaune 5 > x > 0 ; Vert clair représente une diminution 0 > x > 5 unités ; Vert foncé > 5. La méthode d'évaluation d'impacts utilisée est Impact 2002+ v2.1.

Concernant le dommage sur les ressources et l'impact sur le changement climatique, les trois types de gaz sont toujours plus performants que le gaz naturel. En revanche les dommages sur la qualité de l'écosystème et la santé humaine sont toujours plus importants pour les carburants alternatifs que pour le carburant fossile de référence à l'exception de la gazéification et de l'éthanol pour la santé humaine.

La figure 9, qui représente les résultats pondérés, montre que le biogaz à partir de la cofermentation est le carburant prédominant dans les jeux de pondération les plus probables. Cependant le gaz à partir de la gazéification ainsi que le carburant fossile peuvent-être compétitifs dans certaines conditions. La monofermentation n'apparaît pas car est toujours plus mauvaise que les carburants affichés. La figure 10 ne compare que l'éthanol, la monofermentation et le carburant fossile. Elle montre que l'essence est un meilleur carburant que le biogaz produit à partir de la monofermentation ou bien que l'éthanol.

Si le calcul est réalisé en utilisant la méthode d'évaluation des dommages ecoinicator99 ([12]) les carburants alternatifs sont nettement avantagés en comparaison au carburant fossile, notamment la cofermentation et la gazéification qui deviennent clairement les plus performants. L'éthanol et la monofermentation sont aussi avantagés, mais dans une moindre mesure et l'essence leur reste supérieur.

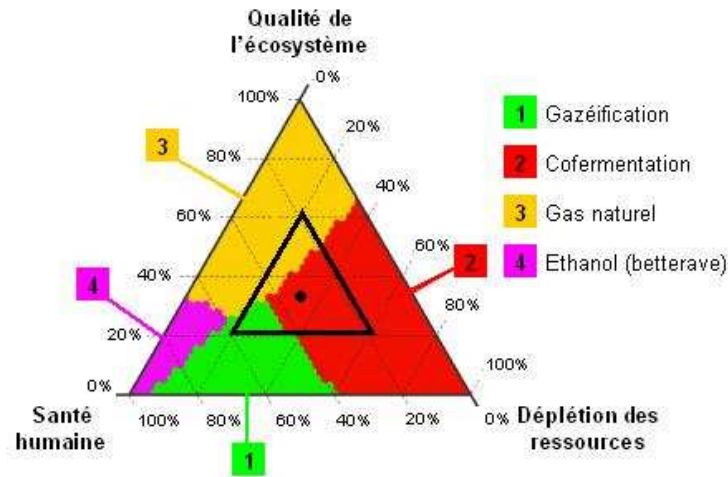


Figure 9 : Classement des carburants en fonction de leur dommage environnemental agrégé. Plus la surface est importante et plus grand est le nombre de pondérations pour lesquelles le carburant est préférable aux autres. I2002+ v2.1.

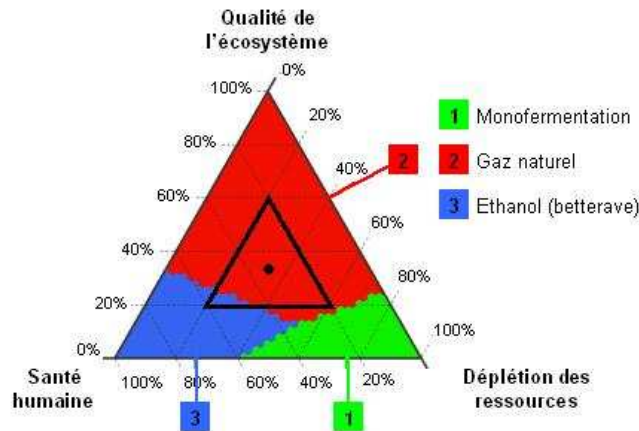


Figure 10 : Classement des carburants en fonction de leur dommage environnemental agrégé. Plus la surface est importante et plus grand est le nombre de pondérations pour lesquelles le carburant est préférable aux autres. I2002+ v2.1.

La conclusion est que la monofermentation ne peut être compétitive que si la déplétion des ressources et le réchauffement climatique deviennent des problématiques prioritaires pour les décideurs ou bien si le processus est fortement amélioré.

6 Eco-conception

AUTEURS : ENRICO BENETTO, JULIEN CARTON, PAULA HILD, COLIN JURY

6.1 Objectifs

Toutes les méthodes considérées jusqu'à maintenant sont appliquées à des produits ou procédés existants afin de les améliorer. Il est pourtant toujours préférable de prévenir au lieu de soigner, autrement dit d'optimiser du point de vue économique et environnemental dès la conception d'un produit ou procédé. Comment appliquer les méthodes illustrées dans cette étape critique d'un produit ou procédé ?

L'éco-conception est une démarche structurée de prise en compte de critères environnementaux lors de la conception de nouveaux produits, procédés et services qui fait l'objet de la norme ISO/TR 14 062. Cette approche vise à réduire les impacts environnementaux le long du cycle de vie du produit tout en préservant (ou améliorant) sa fonctionnalité.

6.2 Méthodologie

La méthodologie d'éco-conception n'est pas arrêtée par la norme ISO 14062. Cependant, à partir d'une synthèse d'approches relevées en littérature ([13-25]) il est possible d'identifier six étapes principales autour desquelles structurer la démarche d'éco-conception.

Planification du projet

Cette étape comprend:

- La définition des principales fonctions et objectifs du produit après une analyse de la demande des clients et du marché,
- La constitution de l'équipe projet; le choix de membres ayant des compétences et des qualités complémentaires est très important afin d'éviter le risque d'une mauvaise ou d'une insuffisante communication avec les concepteurs.

Définition des spécifications du produit

- Définition des caractéristiques (fonctionnelles, esthétiques, techniques, etc.) du produit,
- Etude de marché,
- Etude technico-économique (benchmarking, suivi technique, analyse des coûts),
- Etude réglementaire,
- Evaluation des impacts environnementaux du produit le long de tout son cycle de vie : évaluation quantitative (par l'ACV) ou qualitative.

Développement du produit

Il s'agit de proposer différentes alternatives de concept de produit en intervenant sur:

- L'intensité de matière et de l'énergie du produit (épaisseur des composants, consommation d'énergie pendant la phase d'utilisation)

- La composition (choix de matériaux, des additifs)
- L'assemblage des composants, en essayant de minimiser le volume de l'emballage, de simplifier le démontage en fin de vie, etc.
- Les scénarios de fin de vie et de transport

La définition de nouvelles alternatives peut se faire à l'aide d'outils de créativité et brainstorming. Ces alternatives sont ensuite évaluées, par exemple à l'aide de listes de contrôle et/ou de guides.

Concept préliminaire de produit

Dans cette étape il s'agit de vérifier lesquels parmi les concepts de produit développés lors de l'étape précédente sont en adéquation avec les objectifs de l'éco-conception mis au point lors de la planification. Les alternatives les plus prometteuses sont ainsi choisies. Une ACV simplifiée peut s'avérer nécessaire afin de vérifier cette adéquation et enfin retenir une ou deux seules alternatives à développer ultérieurement.

Concept détaillé de produit

Les alternatives retenues sont complètement développées pour aboutir enfin à la réalisation d'un ou plusieurs prototypes de produit. A ce stade une ACV est nécessaire pour évaluer les avantages du point de vue environnemental de ces alternatives par rapport au produit initial.

Développement, industrialisation et marketing

Il s'agit des dernières étapes qui sont primordiales pour le succès du produit éco-conçu. Ces étapes ne sont pas traitées dans ce rapport.

6.3 Valeur ajoutée pour l'entreprise

La valeur ajoutée pour l'entreprise d'une démarche d'éco-conception est également multiple.

Anticipation des exigences normatives : Un marché propice à la commercialisation de produits éco-conçus est fortement promu par la Commission Européenne, à travers une large batterie d'instruments politiques et de directives (par exemple la Politique Intégrée de Produit, la Directive sur les produits énergivores). D'autres politiques, telles que REACH, concernent un grand nombre de secteurs industriels et vont probablement impliquer des changements importants des secteurs productifs, par exemple le banni de certaines substances et matériaux. Toutes ces initiatives peuvent avoir un impact significatif sur les réalités industrielles qui ne sont pas préparées à les intégrer. L'éco-conception permet d'appréhender ces initiatives et, dans plusieurs cas, d'anticiper et de dépasser les objectifs.

Information environnementale : L'éco-conception permet de disposer d'informations environnementales détaillées sur les produits et d'un benchmarking par le moyen d'une évaluation standardisée (et scientifiquement fondée) des performances environnementales. Ces informations prouvent la réduction de l'incidence environnementale du produit. La perspective ACV assure d'éviter des transferts de pollution. De plus, le fait de concentrer la réflexion d'abord sur la fonction délivrée par le produit et ensuite sur le produit en lui-même seulement après permet de mieux identifier les attentes des clients.

Innovation : Le fait de penser aux impacts environnementaux d'un produit dès sa conception permet d'ouvrir un nouvel angle de vue et ainsi d'identifier de nouvelles idées et opportunités de marketing, de nouvelles solutions et concepts environnementaux, de mieux sensibiliser et informer les consommateurs, de mieux communiquer en interne et en externe.

Image environnementale : L'éco-conception permet une différenciation forte sur le marché du produit. L'information environnementale fournit une base pour la communication et le marketing vers les clients à travers, par exemple, les écolabels ou les déclarations environnementales de produit. La démarche d'amélioration continue du produit, propre de toute démarche d'éco-conception, assure l'image de pérennité de l'entreprise.

6.4 Exemple: Éco-conception d'un matériau bio-polymère multicouche

L'acide polylactique (PLA) est un bio-polymère obtenu à partir du maïs par hydrolyse et fermentation. Le PLA a plusieurs domaines d'application (notamment dans le secteur biomédical et dans les emballages) grâce à ses propriétés mécaniques et sa biodégradabilité ([26, 27]). Cependant, le PLA est plus cher que les plastiques conventionnels. De plus, les densités du PLA et du PET sont très similaires, ce qui empêche la séparation du PLA dans les installations de tri des déchets par des techniques conventionnelles. Cela induit la contamination des flux de matière ce qui nuit au recyclage du PET. Pour cette raison, les recycleurs ne s'intéresseront pas au PLA aussi longtemps que le recyclage ne sera pas économiquement viable. Dans le projet VALMAT⁷, financée par les Fonds pour le Développement Régional (FEDER), le Ministère de l'Economie et le MCESR luxembourgeois, le CRTE et le LTI (Laboratoire des Technologies Industrielles) collaborent au développement d'un nouveau matériau multicouche pour l'emballage alimentaire. L'objectif et les spécifications du nouveau matériau sont définis à partir des principes suivants : 1) il doit favoriser le recyclage chimique du PLA qui permet d'améliorer sensiblement ses performances environnementales en fin de vie ([28]); 2) il doit être naturel, permettre une réduction significative du coût de production de l'emballage à base de PLA et maintenir (ou améliorer) sa biodégradabilité.

Différents mélanges de PLA et d'autres bio-polymères ont été étudiés. Finalement, le mélange du PLA avec de la paille thermoplastique (TPS, [29]) a été retenu. Le multicouche comprend une couche interne de TPS entre deux couches externes de PLA et il a été développé selon la méthodologie présentée auparavant. La densité du TPS étant plus élevée que la densité des autres thermoplastiques, la séparation du matériau multicouche des autres déchets plastiques se fait par sédimentation. La biodégradabilité du multicouche est aussi améliorée ([30-32]). Cependant, le PLA étant hydrophobe et le TPS hydrophile, leur compatibilité s'avère problématique. Afin de rendre la surface du PLA hydrophile et ainsi assurer la compatibilité avec le TPS, le traitement de surface par le plasma atmosphérique est testé.

Le produit à éco-concevoir est un emballage alimentaire de 500 mL constitué exclusivement du nouveau matériau multicouche. Différentes alternatives de produit ainsi obtenues, notamment en faisant varier les épaisseurs des couches et les paramètres

⁷ VALMAT: VALorisation des MATériaux

opérationnels du plasma, ont été validées par une ACV détaillée à l'aide du logiciel SimaPro^{®8}. L'unité fonctionnelle choisie est la production de 1000 emballages alimentaires.

Les meilleurs paramètres opérationnels obtenus pour le plasma ont permis de réduire l'angle de contact de 78° à 30°, ce qui correspond à une amélioration des propriétés hydrophiles. Néanmoins, cette variation n'est pas encore stable car après 10000 minutes l'angle de contact atteint de nouveau 60°.

L'ACV des différentes alternatives de produit inclut la production des matières premières, les processus de production (extrusion du film, thermoformage, traitement plasma), le transport, l'assemblage et la fin de vie des produits. La phase d'utilisation est exclue car c'est la même que pour un emballage de PLA pure. Concernant la fin de vie, trois scénarios sont étudiés : recyclage chimique, digestion anaérobie et recyclage de plastiques mixtes, par exemple dans des barrières sonores urbaines, ce qui constitue la seule voie de recyclage actuellement viable des mélanges de plastiques contenant du PLA. L'emballage fait à partir du matériau multicouche engendre actuellement des impacts environnementaux plus élevés que le même produit fait à partir de PLA pure (Figure 9). Le traitement par plasma atmosphérique est le principal responsable, à cause des consommations énergétiques liées à la production du gaz porteur N₂. Cette analyse a permis d'identifier des opportunités d'amélioration, à savoir une réduction de la durée du traitement et l'utilisation d'air filtré à la place d'azote liquide. Avec aussi la réduction de l'épaisseur des couches, ces améliorations permettent de réduire de 30 à 43% les dommages engendrés par les emballages et ainsi de rendre le multicouche compétitif par rapport au PLA.

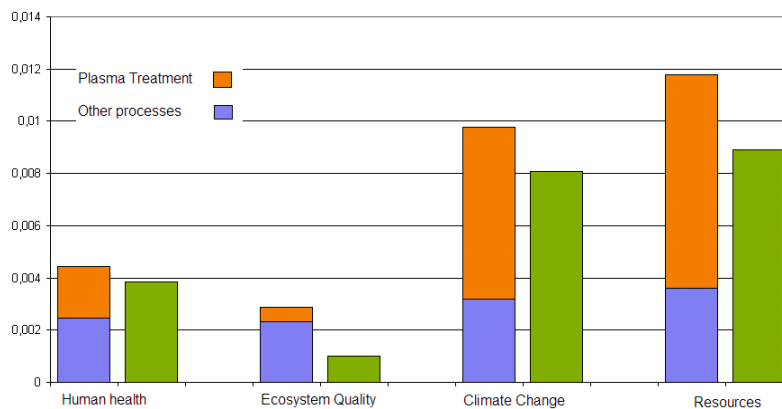


Figure 9 : Dommages (Impact2002+, exprimés en points) engendré par 1000 emballages faits de PLA pure (en vert) et 1000 emballages faits de multicouche

L'étude a montré la valeur ajoutée de la prise en compte de critères environnementaux lors de la conception d'un nouveau produit par une méthodologie structurée. Le développement du produit (le cas échéant par réalisation de prototypes) et la vérification de ces performances environnementales par une approche ACV ont pourtant des échelles de temps assez différentes. Le développement demande des prises de décision et une planification stratégique, auxquelles l'ACV peut contribuer efficacement.

⁸ www.pre.nl

7 Conclusions

AUTEUR : ENRICO BENETTO

Les différents outils et techniques présentés dans le cadre du présent rapport et les exemples d'application permettent de tirer trois conclusions principales.

Tout d'abord, bien que les approches présentent des méthodologies, des objectifs et des contextes d'applications très différents, ils s'avèrent néanmoins complémentaires. Ils permettent conjointement d'améliorer les performances environnementales des systèmes étudiés, tout en reliant faisabilité technique et analyse économique, ainsi qu'en mettant à disposition les informations nécessaires à la communication et au marketing. La complémentarité entre les outils devrait faire l'objet d'études ultérieures. Il serait par exemple intéressant d'établir une cartographie des outils par rapport aux questions énoncées et au contexte d'application.

Deuxièmement, les principales opportunités de recherches sont identifiées. Concernant l'AFME, des applications sur des systèmes complexes comprenant l'analyse de multiples flux, de matières comme d'énergie, devraient être envisagées. Ces mêmes systèmes pourraient également faire l'objet d'une optimisation exérgétique. Concernant l'analyse émergétique, la pertinence de cette approche pour l'évaluation de certains impacts environnementaux (par exemple la consommation de ressources naturelles, telles que l'eau ou les sols fertiles) et l'analyse de l'efficacité énergétique mérite aussi de faire l'objet de recherches ultérieures. Finalement, l'Analyse du Cycle de Vie doit être encore mieux intégrée à la démarche d'éco-conception, par exemple par le développement d'outils d'évaluation simplifiés.

Finalement, les cas d'études montrent la pertinence et la valeur ajoutée de ces approches pour la réalité luxembourgeoise. Considérant le tissu industriel diversifié d'une part et les engagements et objectifs en termes d'énergie renouvelable pris d'autre part, il paraît évident que l'application des outils et des approches apporte non seulement un bénéfice concret sur le terrain pour les acteurs industriels et les organismes institutionnels, mais aussi le contexte idéal pour le développement des méthodologies sus-citées.

Références

1. Szargut, J., *EXERGY METHOD: Technical and Ecological Applications*. Developments in Heat Transfer Volume 18. 2005: WITpress. 164.
2. Dincer, I. and M.A. Rosen, *Exergy - energy, environment and sustainable development*. Elsevier. 2007. 454.
3. Jolliet, O., M. Margni, and R. Charles, *IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*. International Journal of LCA, 2003. **8**(6): p. 324-330.
4. Odum, H.T., *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. 1996: John Wiley & dond, inc. 370.
5. Sciubba, E. and S. Ulgiati, *Emergy and exergy analyses: Complementary methods or irreducible ideological options?* Energy, 2005. **30**: p. 1953-1988.
6. Brown, M.T. and S. Ulgiati, *Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation*. Ecological engineering, 1997. **9**: p. 51-69.
7. Brown, M.T. and M.B. Vivas, *Landscape Development Intensity Index*. Environmental Monitoring and Assessment, 2004. **101**(1-3).
8. Brown, M.T. and E. Bardi, *Handbook of Emergy Evaluation: Folio #3: Emergy of Ecosystems*. Center for Environmental Policy Environmental Engineering Sciences. 2001, University of Florida: Gainesville. p. 94.
9. Jury, C., et al., *Life cycle assessment of biogas production by dry monofermentation of energy crops and injection into the natural gas grid*. To be submitted to Environment International, 2009.
10. Guinée, J.B., et al., *Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standards*. 2002, Centre of Environmental Science: Leiden University, Leiden, The Pays-Bas.
11. Hauschild, M. and J. Potting, *Spatial differentiation in life cycle impact assessment - The EDIP 2003 methodology. Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency*. 2003, Technical university of Denmark.
12. Goedkoop, M. and S. R., *Eco-indicator 99 methodology report, third edition*. 2001, PRé Consultant: Amersfoort.
13. ADEME, *Eco-design, What does it mean?* 2000, Ademe Publications.
14. Backer, C., *Environmental information for industrial designers*". 1995, Delft University of Technology: Netherlands.
15. Brezet, J.C. and C. Van Hemel, *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*". 1997, PNUE: Paris, France.
16. Cramer, J. and C. Van Hemel, *Barriers and stimuli for ecodesign in SMEs*. Journal of Cleaner Production, 2002.
17. Dowie, T.A., *A disassembly planning and optimisation methodology for design*. 1995, The Manchester Metropolitan University (United Kingdom),: Manchester.

18. Ehrenfeld, J. and M.J. Lenox, *The development and implementation of DfE programme*. The journal of sustainable product design, 1997. **1**: p. 17-27.
19. Fiksel, J., *Design for Environment, Creating Eco-Efficient Products and Processes*. 1996: McGraw-Hill, California. p. 95 p.
20. Halog, A., *Selection of sustainable product improvement alternatives*. 2002, University of Karlsruhe, Germany: Karlsruhe.
21. Janin, M., *Démarche d'éco-conception en entreprise, un enjeu: construire la cohérence entre outils et processus*. 2000, ENSAM: Chambéry, France.
22. Keoleian, G.A. and D. Menerey, *Life Cycle Design Guidance Manual - Environmental requirements and the product system*. 1993, US EPA.
23. Lee, K.M. and P.J. Park, *Ecodesign best practice of ISO/TR 14062*. 2005, Committee on trade and investment, APEC.
24. Puyou, J.B., *Démarches d'éco-conception en entreprise", Techniques de l'Ingénieur*. 1999, Techniques de l'Ingénieur, G6050.
25. Ventère, J.P., *Conception écologique des produits*. 1997, Techniques de l'Ingénieur G6 000.
26. Garlotta, D., *A literature review of poly(lactic acid)*. Journal of Polymers and the Environment, 2001. **9**: p. 63-84.
27. Gupta, A.P. and V. Kumar, *New emerging trends in synthetic biodegradable polymers Polylactide : A critique*. European polymer journal, 2007. **43**(10): p. 4053-4074.
28. Detzel, A. and M. Krüger, *Life Cycle Assessment of Polylactide: a comparison of food packaging made from NatureWorks PLA and alternative materials*. 2006, IFEU: Heidelberg.
29. Averous, L., *Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: a review*. Journal of macromolecular science, 2004.
30. Copinet, A., R. Gattin, and B. C, *Biodegradation study of a starch and poly(lactic acid) co-extruded material in liquid, composting and inert mineral media*. LWT - Food Science and Technology, 2001. **39**(6): p. 591-597.
31. Lovino, R., et al., *Biodegradation of poly(lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions*. Polymer Degradation and Stability, 2008. **93**(1): p. 147-157.
32. Itavaara, M., S. Karjoma, and J.F. Selin, *Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions*. Chemosphere, 2001. **46**(6).