


Projet de Master - Juin 2010



**CONCEPTION D'UN OUTIL D'OPTIMISATION DE
PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE UTILISANT
L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE ET LES CONCEPTS DE
L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE**

Jérôme Mayer – SSIE

Enseignant responsable : Dr. François Maréchal

Ingénieure responsable : Léda Gerber



Projet de TdM 30 crédits de MAYER Jérôme

Development of an optimization tool for environomics performances at a regional scale using the life cycle assessment and the industrial ecology concepts

Contexte

Life Cycle Assessment (LCA) has been widely used for the environmental evaluation of products, services and systems. However, though the established methodology proved good for the analysis of the impacts, a number of developments are necessary in order to use it to systematically propose impact reduction measures through process design and technology choices.

The extension of the LCA methodology could be established by analogy with energy conversion system design techniques, such as thermo-economic optimization and process integration and synthesis techniques. In addition to process design and selection, it would allow for systematic identification of industrial ecology and recycling possibilities. It could then be used for the design of a process, or for the territorial planification of a region considering simultaneously material and energy services to be supplied.

Objectifs

The objective of this master project is to establish a methodology for the environomic optimization of the material and energy flows at the scale of territory using the LCA approach.

The tool conceived during a former semester project will be completed and used in this optic.

This project will include the following steps:

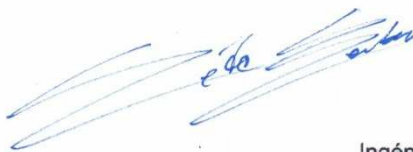
- Literature review
- Definition of the functional unit to be studied (i.e. the region of interest and the different energy and material services to be supplied)
- Construction of the superstructure of ecoinvent unit processes and associated life cycle inventory and costs
- Establishment of correspondance tables for systematic identification of recycling and substitution possibilities
- Formulation of the optimization problem and application to several LCIA indicators
- Results analysis and conclusions
- Report and presentation

Software

Matlab, Osmose, Ampl, ecoinvent

Lausanne, le 26/05/2010

Validation du projet:



Ingénieur responsable: **Léda Gerber**
leda.gerber@epfl.ch



Enseignant responsable: **Dr. MER F. Maréchal**
(tél: 021/693.35.16) / francois.marechal@epfl.ch

#Project ID: 426

Imprimer cette page

Fermer cette page

Résumé

Les problématiques liées aux impacts environnementaux de notre société ne cessent de croître depuis plusieurs décennies. Il devient urgent de trouver des solutions afin de permettre un développement durable de notre société. Pour ce faire une méthode connaissant un fort développement actuellement est l'analyse de cycles de vies (ACV) qui permet de quantifier les impacts environnementaux. L'outil qui a été développé ici sous Matlab reprend les méthodes de calculs des ACV et permet de sortir des structures rigides définie par les bases de données comme Ecoinvent. Ceci permet de proposer des alternatives aux process constituant un système et d'élargir les possibilités de synergies. A l'aide du programme d'optimisation AMPL, la recherche des substitutions et des synergies permettant de réduire au maximum les impacts environnementaux d'un système devient systématique et automatique. L'optimisation peut se faire pour les différents types d'impacts environnementaux et peut aussi intégrer la dimension économique afin de procéder à des optimisations multi objectives. Un tel programme peut s'appliquer à de petites échelles mais il devient encore plus intéressant lorsqu'il est utilisé à de grandes échelles, comme les parcs industrielles, où les possibilités de synergie son décuplées.

Liste des abréviations

ACV	Analyse de cycle de vie
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
UPR	Unit process raw data
BTL	Biomass To Liquid
EI	Ecoinvent
SIG	Système d'informations géographiques

Table des matières

Sommaire

1.	Introduction.....	1
1.1	Contexte.....	1
1.2	Objectifs.....	1
1.3	Structure du rapport.....	2
2.	Considérations théoriques.....	2
2.1	Scénarios ACV.....	2
2.2	Ecologie industrielle.....	2
3.	Bases de données : Ecoinvent.....	2
3.1	Structure.....	2
3.2	Calcul de l'impact.....	3
3.3	Acquisition et traitement.....	4
4.	Alternatives.....	6
4.1	Définition des alternatives.....	7
4.2	Structure choix.....	7
4.3	Intégration dans l'arborescence.....	7
5.	Recyclages.....	8
5.1	Définition des recyclages.....	8
5.2	Structure des recyclages.....	9
6.	Résolution mathématique.....	9
6.1	Modèle linéaire.....	9
6.1.1	Détails des matrices.....	10
6.2	Optimisation.....	11
6.2.1	Fonctions AMPL.....	11
6.2.2	Traitement des résultats.....	12
7.	Vue d'ensemble du programme.....	13
8.	Validation du modèle.....	14
8.1	Cas sans alternatives ni recyclages.....	14
8.2	Cas simple avec alternatives.....	14
8.3	Cas simple avec recyclages.....	14
8.4	Cas simple avec alternatives et recyclages.....	15
8.5	Application à la pratique.....	15
9.	Cas d'étude.....	15

9.1	Présentation.....	15
9.2	Résultats.....	16
9.2.1	Système global non optimisé.....	16
9.2.2	Système « plâtrerie » seul optimisé.....	17
9.2.3	Système « scierie » seul optimisé.....	18
9.2.4	Système « raffinerie BTL » seul optimisé.....	18
9.2.5	Système global optimisé.....	19
10.	Perspectives et développements futurs.....	20
10.1	Création des bases de données.....	20
10.2	Intégration de la fonction coût.....	21
11.	Conclusion.....	21
12.	Références.....	22
13.	Remerciements.....	23
14.	Annexes.....	24

1. Introduction

Actuellement, les problématiques environnementales sont de plus en plus présentes sur le devant de la scène politico-économique. En effet, en plus de la lente prise de conscience de la société de son influence sur l'environnement, les industriels commencent aussi à s'intéresser à leurs impacts environnementaux. Cette volonté de réduire les impacts sur l'environnement demande donc de revoir la façon de consommer et de produire les biens et les services. Pour ce faire nous devons être capables d'amener les solutions technologiques et méthodologiques permettant à la société de se développer de façon durable, en harmonie avec l'environnement. A moyen et long terme un tel développement est indispensable pour la stabilité de notre société, que ce soit au niveau environnementale, sociale ou économique.

Une des voies actuellement suivie est de quantifier et de localiser les impacts de nos activités afin de mieux réduire leurs impacts sur l'environnement. Pour ce faire un des outils utilisé est l'analyse de cycle de vie (ACV). Les analyses de cycles de vie permettent l'évaluation quantitative de l'impact environnementale d'un process du « berceau à la tombe » rendant ainsi l'amélioration d'un système mesurable et ainsi plus aisé.

1.1 Contexte

Les analyses de cycles de vie s'appuient sur des bases de données de process unitaires comme par exemple Ecoinvent. Ces bases de données sont des inventaires très vastes pour les différents process unitaires mais qui ont comme faiblesse d'être rigides, ce qui ne permet pas d'optimiser un système pour une unité fonctionnelle donnée. Pour un process unitaire donné les options choisies pour son assemblage (nœuds de l'arborescence) sont déterminées de manière fixe et il n'y actuellement pas de méthode automatique permettant des modifications aux nœuds afin d'optimiser le système selon le ou les critères choisis (minimisation des émissions de CO₂, des impacts sur la santé humaine, des coûts, etc.). Il serait donc intéressant de sortir de cette structure rigide en amenant des alternatives aux nœuds des différents niveaux de l'arborescence afin de permettre l'optimisation du process et ainsi du système tout entier en.

De plus, même si des allocations sont déjà présentes dans les bases de données, beaucoup de process engendrent des déchets qui ne sont pas valorisés. Il serait donc intéressant de développer un outil qui permet de détecter les synergies possibles entre les différents process d'un système et ainsi d'améliorer les performances environnementales et économiques de ce dernier.

1.2 Objectifs

Le but de ce travail est de développer un outil qui permette une amélioration des performances environnementales d'un système de façon systématique et automatique en utilisant les ACV et les concepts de l'écologie industrielle. Pour ce faire il a fallu travailler sur les bases de données existantes sur lesquelles s'appuient les ACV. Puis il a fallu développer une méthodologie permettant de proposer les alternatives et les recyclages possibles s'appliquant à un système, ainsi qu'une méthode d'optimisation permettant la minimisation de l'impact environnementale du système en effectuant les meilleurs choix.

Le but final d'un tel outil sera de proposer aux industriels un outil leur permettant d'optimiser leurs systèmes du point de vue des performances environnementales mais aussi d'y les performances économiques. Le temps à disposition durant un projet de master ne permettant pas de finaliser un tel projet, le présent rapport est écrit dans l'optique qu'il puisse être repris par une autre personne par la suite.

1.3 Structure du rapport

Le rapport va tout d'abord présenter les outils disponibles nécessaires à la conception de l'outil d'optimisation. Puis le corps du travail présente le développement du programme développé. Et enfin afin de tester le programme développé une étude d'un cas sera présentée.

2. Considérations théoriques

2.1 Scénarios ACV

Lorsqu'un système de production ou de service est analysé il est possible de mesurer son impact environnemental afin de le comparer à d'autres systèmes qui délivrent la même unité fonctionnelle. Ainsi il est possible de déterminer quels sont les scénarios les plus intéressants du point de vue environnemental. Les différents scénarios qui peuvent être constitués sont la combinaison des différentes alternatives envisageables lors du choix des produits et des méthodes de production. Le scénario ayant l'impact environnemental le plus faible relativement aux autres sera celui où le choix des alternatives a été le plus judicieux.

2.2 Ecologie industrielle

L'écologie industrielle essaye de représenter les systèmes industriels en tant qu'écosystèmes dans l'optique du développement durable de notre société. Le concept est d'abandonner les systèmes « end of pipe » et de voir les outputs non plus comme des déchets mais comme des matières premières susceptibles d'être réutilisées ailleurs dans le système. Un tel concept peut s'appliquer à différentes échelles, de quelques entreprises au système industriel dans son ensemble. Les quatre grands concepts de l'écologie industrielle sont : Valoriser les déchets, boucler au maximum les cycles matières, dématérialiser les produits et les activités économique et enfin décarboniser l'énergie [1].

3. Bases de données : Ecoinvent

3.1 Structure

La base de donnée Ecoinvent [9] a été créée en 1997 par plusieurs institutions suisses (ETHZ, PSI, EMPA et ART) et est très régulièrement complétée et mise à jour. Il s'agit de la base de données la plus largement utilisée dans le domaine des écobilans. Elle contient des inventaires de cycle de vie pour plusieurs milliers de process utilisés dans les domaines de l'énergie, des matériaux (matières primaire, papier, métaux, chimique, ...), du traitement des déchets, des transports, de l'agriculture ou encore de la construction [2].

Unit process raw data :

Les UPR donnent pour le process de référence les process en inputs et les process en outputs dont il est constitué. Ils composent son arborescence. Cette arborescence est généralement constituée d'une multitude de niveaux car les inputs et outputs du process de référence sont composés d'autre process qui eux même sont constitués d'autres process et ainsi de suite, ce qui crée une arborescence qui devient vite très importante.

En plus de ces process constituant l'arborescence du process de référence, d'autres flux de matières sont décrits dans les UPR. Il s'agit des flux élémentaires. Les inputs sont des ressources et les outputs sont des flux de matières qui sont dans la nature, pour la plupart de manière diffuse.

LCI :

Une fois tous les inputs et outputs d'un process définis, Ecoinvent les convertis en flux entrant de matière première et en flux sortant de pollution dans les différents compartiments de l'environnement. Cette liste compose les données LCI et on parle généralement de résultats midpoint.

LCIA :

Les LCIA utilisent les différentes méthodes existantes pour quantifier l'impact sur l'environnement qu'induit une unité du produit de référence considéré. Pour ce faire Ecoinvent considère les résultats LCI et les convertit, selon différentes méthodes, en unité équivalente ou en points pour chaque classe d'impact que définit la méthode. On parle alors de résultat endpoint. Différente méthode existent, comme par exemple Impact 2002+, EDIP 2003 ou encore IPCC 2007 axé sur la problématique du réchauffement climatique.

3.2 Calcul de l'impact

Dans le travail présenté ici l'impact environnemental du système analysé est calculé en endpoints selon la méthode IMPACT2002+ qui converti les inputs et outputs en impacts dans différentes catégories de dommages comme à la figure 1. Il s'agit ici d'une pondération des différents impacts mesurés (notamment pollution ou utilisation des ressources) qui est propre à la méthode de calcul. Ainsi les résultats peuvent varier en fonction de la méthode de calcul choisie.

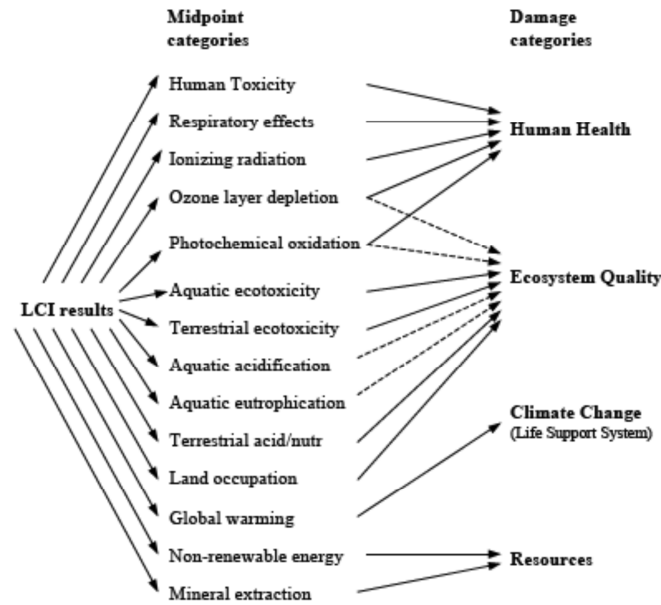


Figure 1: Catégorie Impact 2002+

L'impact LCIA d'un process est la somme des impacts de tous les flux élémentaires constituant l'arborescence total du process. Pour les scripts qui ont été développés lors de ce travail le calcul de l'impact est hybride car on ne descend pas dans l'arborescence jusqu'aux flux élémentaires. Car seulement pour les quelques premiers niveaux, les alternatives et les recyclages proposés sont pertinents. Le calcul de l'impact se fait en sommant les valeurs LCIA des process du dernier niveau avec les impacts IMPACT2002+ des flux élémentaires de tous les process de l'arborescence à l'exception de ceux du dernier niveau. La méthode de calcul implémentée dans les scripts peut donc être décrite selon l'équation ci-dessous.

$$Impact = \sum_{niveau=0}^{n-1} Impact_{process(niveau)} + Impact_{process(niveau=n)}$$

Bien que nous utilisons Impact2002+ pour le calcul des impacts, d'autres méthodes peuvent être utilisées. Il est d'ailleurs conseillé lors d'une ACV d'analyser un système selon différentes méthodes de calculs car les pondérations de chaque méthode sont subjectives.

3.3 Acquisition et traitement

La première étape a été d'acquérir la composition et les impacts de chacun des produits présents dans la base de données. Il a donc fallu importer et structurer toutes les informations contenues dans la base de données Ecoinvent. Les impacts liés à chaque process de la base de données ont été classés en deux catégories, les impacts process et les impacts des flux élémentaires. Quant à la composition de chaque process il a été nécessaire d'importer toutes les données des UPR.

Acquisition des impacts : LCIA et flux élémentaires

L'optimisation va se faire au niveau des impacts environnementaux. Il va donc être nécessaire d'acquérir toutes les données relatives aux impacts de chaque produit présent dans la base de données Ecoinvent. Il y a deux types d'impacts qu'il va falloir acquérir : les impacts des process et les impacts des flux élémentaires. Tous deux sont donnés selon la méthode de calcul choisie,

Impact2002+, qui définit quatre catégories d'impacts : impacts sur la santé humaine, sur les écosystèmes, sur les changements climatiques et sur les ressources.

Impacts des process : Les impacts process sont les impacts qu'une unité d'un process donné produit. Il s'agit des impacts LCIA de la base de données Ecoinvent qui sont importés dans une structure matlab à l'aide de la fonction *Acquisition_LCIA_new.m*. Cette fonction ainsi que la structure résultante, *flows_lcia_total_impact2002.mat*, se trouvent dans l'annexe numérique. Pour chaque process de la base de données, la fonction extrait le numéro du process, la méthode de calcul de l'impact (dans notre cas seul la méthode Impact 2002+ est extraite), la catégorie de l'impact, l'unité (l'unité est le point car il s'agit de résultats endpoint traiter par la méthode de calcul), ainsi que la valeur de l'impact. A noter que c'est la somme des impacts des process d'un système qui permettra de définir l'impact total du système.

Impact des flux élémentaires : Les impacts des flux élémentaires sont les impacts que les flux élémentaires associé à un process produisent. Il s'agit ici non plus de point, comme pour les impacts LCIA, mais de quantité de matière équivalente relâchée dans un certain compartiment de l'environnement (air, eau, sol). Ces impacts ont été importés d'Ecoinvent à l'aide de la fonction *Acquisition_IMPACT2002.m*. Cette fonction ainsi que la structure résultante, *Impact2002.mat*, se trouvent dans l'annexe numérique. Pour chaque process composé de flux élémentaires la fonction permet l'acquisition de chaque flux élémentaire du process avec les informations suivantes : Compartiment dans lequel le polluant est relâché (category), le nom du polluant, la quantité relâchée ainsi que l'unité de cette quantité.

Acquisition des UPR

La première étape a été d'acquérir la composition de chacun des produits présents dans la base de données car chaque produit de référence est composé de sous-produits. Pour ce faire une fonction a été développée pour créer une structure Matlab comprenant toute ces informations. La fonction d'acquisition, *Acquisition_UPR_new_1_3.m*, et la structure ainsi obtenue, *flows_upr_new.mat*, se trouvent dans l'annexe numérique. Un aperçu de la structure est présenté en annexe 1. Pour chaque process la fonction permet d'acquérir tout les process le composant avec pour chacun d'eux les informations suivantes : le numéro du process, le nom de ce process, sa catégorie, sa quantité par unité du process qu'il compose, ainsi que l'unité de la valeur. A noter que lors de cette acquisition il à été nécessaire de distinguer les process qui était des flux élémentaire de ceux qui n'en était pas. En effet, les flux élémentaires sont composés de flux de matière qui sont des flux de polluants impactant l'environnement alors que le reste des process sont des process composé d'autre process ce qui permet de créer l'arborescence. Afin de faire la distinction entre ces deux type de process UPR il fallut faire un test pour chaque process. Si un process a un impact LCIA associé dans la structure *flows_lcia_total_impact2002* précédemment créée il ne s'agit pas d'un flux élémentaire et il peut être importé dans la structure *flows_upr_new.mat*. Dans le cas contraire, pas d'impact LCIA associé, il s'agit d'un flux élémentaire et ainsi il a fallu acquérir les flux de polluants pour chacun de ces process en créant une structure pour chaque type d'impact (human health, ecosystem quality, climate change et ressource). Les structure ainsi créés sont *flows_upr_out_hh*, *flows_upr_out_eq*, *flows_upr_out_cc*, *flows_upr_out_re*.

Création de l'arborescence

Un process de référence, niveau 0, est composé de sous-process, ce qui définit le niveau 1. Ces sous-process sont eux même composés de sous-process qui composent alors le niveau 2 et ainsi de suite, figure 2. Afin de déterminer le niveau de cut-off dans l'arborescence que l'on veut appliquer il faut définir dans le frontend la valeur de la variable *niveau_choix*. Une fois cette valeur définie la suite des fonctions qui vont être présentées vont travailler jusqu'au niveau ainsi déterminé. Dans la pratique il s'avère que de travailler jusqu'au niveau 3 est suffisant d'autant plus qu'au-delà les puissances de calcul disponibles deviennent limitantes.

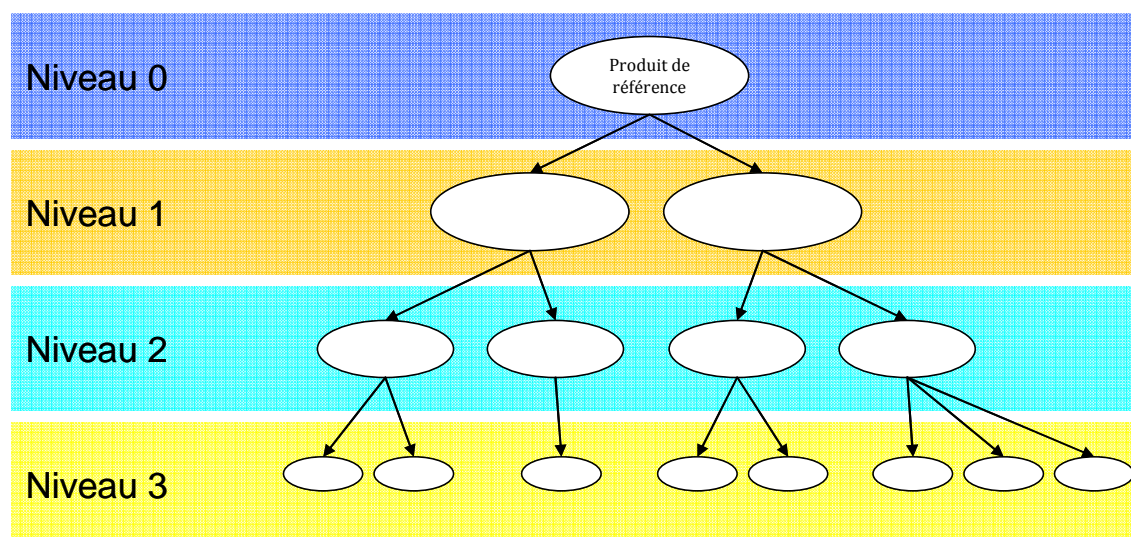


Figure 2: Arborescence UPR

Pour créer l'arborescence d'un produit la fonction *file_m_arbo.m* a été développée sous Matlab. Cette fonction va uniquement réécrire automatiquement la fonction, *file_arbo.m*, selon le cut-off choisi dans le frontend, qui permet de créer l'arborescence du process de référence. Le fait de procéder en deux étapes, comme dans le cas présent, permet de choisir indifféremment le nombre de niveau avec lequel il faut travailler sans avoir à changer le code à chaque changement de cut-off. Ces fonctions ainsi qu'un exemple des structures résultantes se trouvent dans l'annexe numérique.

L'arborescence du process, ou du système ainsi créée, sera contenue dans une structure matlab. Une structure pour chaque niveau sera ainsi créée (avec comme nom *upr_niv_x*, x étant le niveau en question). Chaque process composant le niveau contient comme informations les données suivantes : son cheminement dans l'arborescence (nœud) et les détails pour chaque nœud (quantité, valeur max/min, le ratio. Cette dernière donnée est détaillée au chapitre suivant) ainsi que les détails pour le process en question (quantité, valeur max/min, le ratio et l'unité). Ainsi pour chaque nœud de l'arborescence il est possible d'obtenir toutes les informations le concernant et de savoir par quelle process supérieur il est influencé, et inversement.

4. Alternatives

La base de données Ecoinvent propose une arborescence pour chaque process. Cette arborescence est fixe et il n'y a pas d'alternative proposée à chaque nœud. Le but de ce projet est

justement de proposer des choix aux différents nœuds lorsqu'il y en a la possibilité et par la suite d'optimiser ces choix au niveau de l'impact environnemental.

4.1 Définition des alternatives

Chaque process d'une arborescence est susceptible d'être remplacé par d'autres process. Les alternatives proposées doivent, pour être pris en considération, être réalisable tant techniquement qu'économiquement tout en respectant l'arborescence du process.

Les alternatives proposées peuvent être de deux genres : les variables entières (c'est-à-dire que c'est soit le process de base, soit le process alternatif qui est utilisé) et les variables continues (c'est à dire qu'une fraction de l'alternative peut être utilisé et le solde est composé du process de base). Une caractéristique importante des alternatives est leurs quantités équivalentes, c'est-à-dire la quantité du process alternatif qui est nécessaire pour remplacer le process de base considéré. C'est un ratio qui doit être déterminé lors de la proposition d'une alternative. Ainsi dans les informations relatives aux alternatives proposées il faut indiquer les valeurs maximales et minimales applicable ainsi que le ratio nécessaire à la substitution du process.

4.2 Structure choix

Afin de proposer les alternatives possibles à l'étape d'optimisation du système, les alternatives proposées sont organisées dans la structure *choix.mat* dont un aperçu est présenté en annexe 2. Elle comprend le ratio, les valeurs maximales et minimales applicables. Certaines alternatives sont applicables dans n'importe quel système analysé et peuvent être intégrées directement à la phase d'optimisation alors que d'autres alternatives nécessiteront une étape de validation. Cette structure fonctionne donc comme une base de données et il est nécessaire de la mettre à jour. Il est à noter que le travail nécessaire pour compléter une telle base de données est très important. C'est pour cela que dans le cadre du travail présenté ici seul une partie de cette base de données, nécessaire à l'exemple d'application, est définie.

4.3 Intégration dans l'arborescence

Afin de procéder à l'optimisation il va falloir greffer à chaque process de l'arborescence les alternatives qui y sont associées. Pour ce faire lors de la création de l'arborescence avec la fonction *file_arbo.m*, les alternatives proposées dans *choix.mat* et leur propre arborescence vont être ajoutées à l'arborescence de base. Ainsi l'arborescence qui va être proposée à l'optimisation comprendra la totalité des nœuds possibles incluant toute les alternatives possibles. Cette étape peut augmenter le nombre nœuds de manière très significative et ainsi rendre l'optimisation du système plus longue.

L'arborescence du process, ou du système ainsi créée, sera contenu dans une structure matlab et intègre toute les alternatives qui peuvent être proposées à chaque process de l'arborescence. Dans la structure Matlab créée, les alternatives apparaitront comme des process faisant parti de l'arborescence du process ou du système de base. Dans la structure il seront reconnaissable comme étant une alternative grâce à une information que chaque process contient. Cette information est la ligne *upr_niv_x{k,i}.Alternative_x-1_de* qui donne le process de base auquel le process peut se substituer. Cette information concernant le process que peut substituer le process considéré se retrouve à chaque niveau de l'arborescence et ce également pour tous les niveaux supérieurs.

5. Recyclages

Dans un système, des déchets sont produits aux différents niveaux ce qui crée des impacts environnementaux négatifs. La meilleure façon de traiter ces déchets est de tenter de les valoriser ailleurs dans le système afin de s'approcher au plus d'un système cyclique avec le minimum d'inputs et d'output vers la nature, figure 3. Ainsi en maximisant les synergies dans un système on peut en augmenter l'efficacité énergétique et économique. Afin de détecter les synergies possibles dans un système et afin de mesurer leur efficacité, la suite du travail présenté ici tente d'automatiser la détection des synergies et le calcul des bénéfices ainsi obtenus.

5.1 Définition des recyclages

Les déchets sont présents sous deux formes dans les UPR de la base de données Ecoinvent.

Déchets flux élémentaire : Premièrement, il y a les déchets qui sont les outputs sous forme de flux élémentaires. Ces déchets sont des flux diffus qui sont relâchés dans les différents compartiments de l'environnement, soit l'air, le sol et l'eau. Ces flux sont difficilement exploitables, car diffus, et leur récupération en vue d'un recyclage demande pour la plupart des traitements importants, ce qui complique la situation sans forcément permettre d'arriver à des résultats intéressants. Ces déchets flux élémentaire sont contenus dans les structures décrites plus haut. Soit : *flows_upr_out_hh*, *flows_upr_out_eq*, *flows_upr_out_cc*, *flows_upr_out_re*. Si ces déchets sont diffus et ne peuvent pas a priori être récupérés, les déchets de process UPR sont quant à eux réutilisables comme matière première à un autre endroit du système.

Déchets process UPR : Le deuxième type de déchets présent dans les UPR sont les déchets qui sont définis comme process dans l'arborescence. Il s'agit de flux sortant d'un process et pour certain ils peuvent être recyclable. Ces déchets peuvent soit être réutilisés directement à un endroit du système afin de remplacer un process input nécessaire, soit être réutilisés, mais en nécessitant un traitement intermédiaire, ce qui va engendrer de nouveaux process et impacts dans le système, soit ne pas pouvoir être recyclées.

Afin de donné au programme d'optimisation les possibilités de recyclage à évaluer, une matrice de correspondance doit être construite.

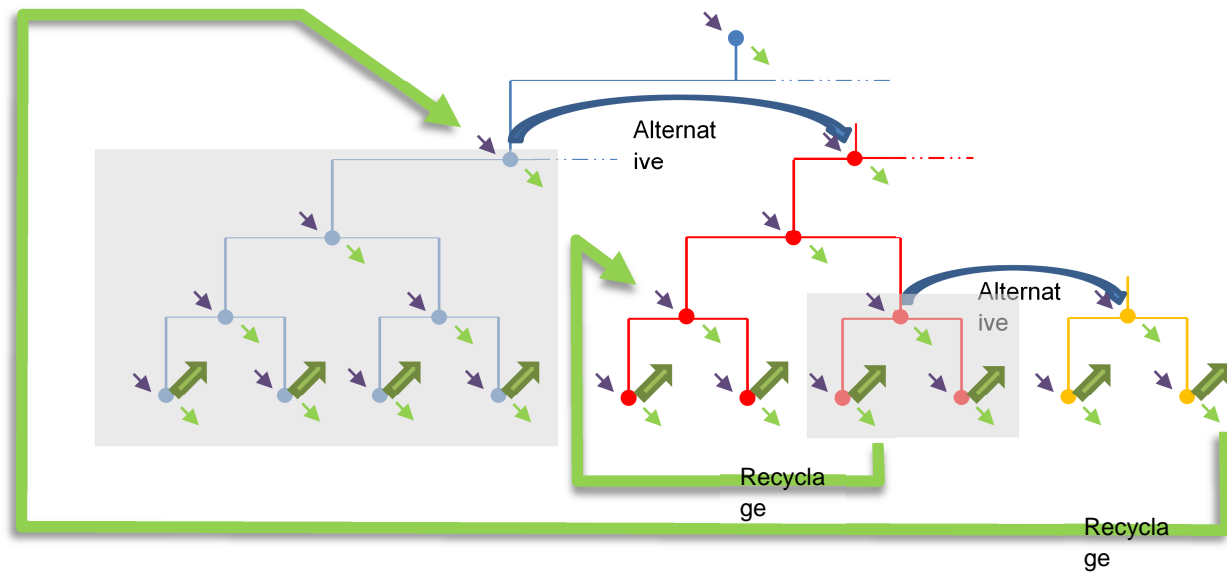


Figure 3: Exemple arborescence avec alternatives-recyclages

5.2 Structure des recyclages

Afin de détecter les synergies possibles dans le système et définir le type de recyclage dont il va s'agir, la matrice de corrélation, *matrice_correspondance.mat*, est utilisée comme une base de données. Cette matrice va permettre de faire des liens entre les process reconnus comme déchets et les process reconnus comme inputs. Si, lors de l'optimisation, des possibilités de recyclage se présentent dans le système elles vont alors être évaluées toujours dans l'optique de diminuer au maximum l'impact environnemental du système. Il est à noter que la définition des correspondances est plus compliquée que prévue car pour certains déchets des allocations sont déjà définies dans Ecoinvent. Le travail pour définir le ratio de correspondance demande une analyse plus approfondie pour remplir la base de données.

Lors du calcul de l'impact environnemental d'un système, tous les process qui rentrent dans la composition finale du système s'additionnent. Lorsque des recyclages peuvent être effectués il est nécessaire de déduire les impacts du output récupéré ainsi que les impacts du input substitué. Ainsi le gain environnemental est double. Ces diminutions des flux entrant et sortant du système sont représentés sous forme matricielle avec des signes négatifs.

6. Résolution mathématique

Maintenant que toutes les informations ont été organisées à l'aide de Matlab, ce chapitre va présenter la résolution mathématique permettant l'optimisation du système analysé.

6.1 Modèle linéaire

Le problème qui doit être optimisé est un problème linéaire. En effet l'objectif est la minimisation de l'impact environnementale qui est constitué de la somme des impacts des process utilisés dans l'arborescence déterminée par l'optimisation.

Objectif: L'objectif est la minimisation de l'impact environnemental du système considéré. Il est possible de choisir, en changeant les variables *consider_xx* dans le *frontend*, quels sont le ou les

impacts que l'on veut optimiser (Impact2002+ : total, changements climatiques, écosystèmes, santé humaine et ressources).

Variables de décision : Les variables de décisions vont être les fractions d'utilisation des différents process lorsque l'utilisation d'alternatives ou de recyclages sont proposés dans l'arborescence. Les recyclages vont permettre de diminuer les inputs nécessaires à un endroit du système tout en diminuant également les outputs à un autre endroit. Les alternatives vont permettre de diminuer l'impact en choisissant les process les plus intéressants.

Contrainte : Les contraintes qui s'appliquent lors de l'optimisation sont que le système analysé doit toujours délivrer le même service et qu'il faut que l'arborescence reste complète dans son intégralité.

Ce problème peut s'écrire matriciellement comme à la figure 4 ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} \text{Matrice comprenant la composition} \\ \text{des process de l'arborescence} \\ + \\ \text{Les alternatives} \\ + \\ \text{Les recyclages} \\ + \\ \text{Impacts} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Fraction} \\ \text{utilisée de} \\ \text{chaque} \\ \text{process} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{pmatrix}$$

M1 M2 M3

Figure 4 : Problème sous forme matricielle

La construction de cette matrice se fait à partir des structures matlab précédemment définies, notamment l'arborescence du système, contenant les process de bases ainsi que les alternatives possibles. Puis on y intègre les structures définissant les impacts des process et des flux élémentaires.

6.1.1 Détails des matrices

Matrice M1 : La matrice M1 comprend les informations décrivant l'arborescence des différents process, les alternatives proposées et les recyclages possibles. L'arborescence de chaque produit est définie en remplissant la matrice colonne par colonne, le process de référence égale à un et sa composition unitaire en négatif. Les alternatives sont introduites en mettant les ratios correspondants dans les deux cellules communes à l'alternative et au process de base. Enfin les recyclages sont introduits comme nouveaux process en introduisant la valeur unitaire sur la ligne correspondant au process du déchet valorisé et sur la ligne du process ainsi substitué. Enfin les cinq dernières lignes de la matrice M1 correspondent aux différentes classes d'impacts propres à chaque process.

Matrice M2 : La matrice M2 comprend les fractions utilisées de chaque process. Il est à noter que pour les lignes correspondantes aux recyclages il s'agit des flux et non pas de fractions utilisées. Lorsque des recyclages sont possibles, un signe négatif apparaît dans les cellules communes aux deux process considéré. Ainsi lors de la somme des impacts du système, lorsqu'un recyclage est effectué, les impacts des outputs et des inputs sont déduits et ainsi participe à la diminution de l'impact total du système.

Matrice M3 : La matrice M3 définit les contraintes qui permettent de respecter, lors de l'optimisation, les demandes du process de référence ainsi que les arborescences des différents process.

Pour plus de détails sur la construction de ces matrices la fonction *file_matrice_ampl.m* se trouve dans l'annexe numérique. Il est à noter que cette fonction est produite automatiquement à l'aide de la fonction *file_m_matrice_ampl.m* qui permet de travailler avec le cut-off choisi pour l'arborescence. Cette fonction se trouve également dans l'annexe numérique.

6.2 Optimisation

Une fois que le système à analyser est défini sous la forme d'un problème matriciel l'optimisation va pouvoir être effectuée à l'aide d'un programme d'optimisation de problèmes linéaires contraints. Dans notre cas le programme choisi est AMPL [10] (A Modeling Language for Mathematical Programming) avec le solver CPLEX qui est un algorithme qui peut travailler avec des millions de contraintes et de variables.

Il est à noter que le programme AMPL existe en version étudiante mais il ne permet pas de faire une analyse d'un système complexe car il est limité à 500 variables. Ainsi il a fallu utiliser la version avec licence se trouvant sur le cluster Pléiades de l'EPFL. Ayant rencontrés des problèmes de compatibilités avec osmose, le frontend n'a pas pu être utilisé. Dès lors il faut utiliser le frontal de AMPL présent sur pléiade mais la limite de temps disponible à un nœud est de 10 minutes, ce qui est insuffisant. Afin de contourner ce problème, le frontal de AMPL est lancé sur les machines alcyone qui n'ont pas de limite de temps. Il est encore à noter que le solver CPLEX utilisé sur pléiades est le *cplexamp.old* et non le *cplexamp* qui semble ne pas être à jour.

6.2.1 Fonctions AMPL

On va demander au programme d'optimisation de résoudre notre problème matriciel défini plus haut. Pour ce faire le programme AMPL demande deux types de fichiers, le premier est le fichier data dans lequel tous les paramètres sont définis. Dans notre cas il s'agit de la matrice M1 (arborescence, recyclage, alternatives et impacts). Le deuxième fichier nécessaire à AMPL est le fichier model qui comporte la définition des variables (dans notre cas la matrice des fractions utilisées), la fonction objective (dans notre cas la minimisation de l'impact environnemental) ainsi que les contraintes s'appliquant à notre système (dans notre cas le respect du output final ainsi que le respect de l'arborescence des différents process).

Afin d'écrire le fichier data pour AMPL la fonction *file_m_data_ampl.m* utilise la matrice *matrice_ampl.mat* précédemment construite. Le fichier data ainsi obtenu, *file_data_ampl.dat*, va pouvoir être utilisé par AMPL. Le fichier model, quant à lui, est écrit automatiquement à l'aide de la fonction *file_m_mode_ampl.m* qui permet d'obtenir le fichier *file_mode_ampl.mod*. Pour plus d'information un exemple de fichier data et model sont présentés en annexe 3 et 4. Les deux

fonctions Matlab sont pour leurs parts présentes dans l'annexe numérique avec des explications dans le code.

Une fois le fichier model et data obtenus ils sont utilisés par AMPL. Il est à noter que la quantité d'information devient vite très importante ce qui rend l'utilisation de la version payante d'AMPL indispensable car la version étudiante est limitée à 500 variables et contraintes.

On donne au programme d'optimisation comme objectif la minimisation de l'impact environnementale. Concrètement il s'agit de minimiser la somme des impacts des process utilisés dans le système. Dans la matrice donnée à l'optimisation, pour chaque process est donné son impact environnementale par unité de process. Ainsi l'optimiseur va faire varier les ratios de chaque process avec des alternatives et ces ratios choisis sont à multiplier avec les impacts associés au process pour obtenir l'impact de l'arborescence évaluée. L'arborescence retenue sera celle avec l'impact le plus faible et les ratios d'utilisation des process optimales ainsi déterminés. A noter que pour chaque arborescence possible évaluée, les possibilités de recyclage sont considérées.

6.2.2 Traitement des résultats

Les résultats de l'optimisation AMPL sont outputés dans le fichier texte `AmplOutput.txt`. Afin d'utiliser ces résultats la fonction `resultats.m` traite ces données afin de présenter le nouveau système obtenu avec les changements effectués et les bénéfices ainsi obtenus.

Il est à noter que dans le `frontend_mix.m`, la précision de AMPL a dû être augmentée, car la précision par défaut est de seulement 6 chiffres significatifs ce qui pose des problèmes lors de l'analyse des résultats de l'optimisation. Le nombre de chiffres significatifs est donc calé sur celui utilisé dans matlab.

Les résultats obtenus permettent de définir la quantité de chaque process que le système utilise ainsi que les recyclages effectués pour atteindre le système avec l'impact environnementale le plus faible. Les process qui nous intéressent sont les alternatives qui ont été choisis ainsi que ceux qui peuvent rentrer dans un recyclage. Afin de les détecter et de les mettre en évidence la fonction `test` teste chaque process en analysant si ils sont considérés comme alternative ou non dans la structure de l'arborescence. Ainsi le résultat permet de visualiser quels sont les process qui peuvent être substitués et où se trouvent les recyclages qui peuvent être mis en place. La dernière étape est d'analyser ces résultats et d'évaluer leur faisabilité physique et économique.

7. Vue d'ensemble du programme

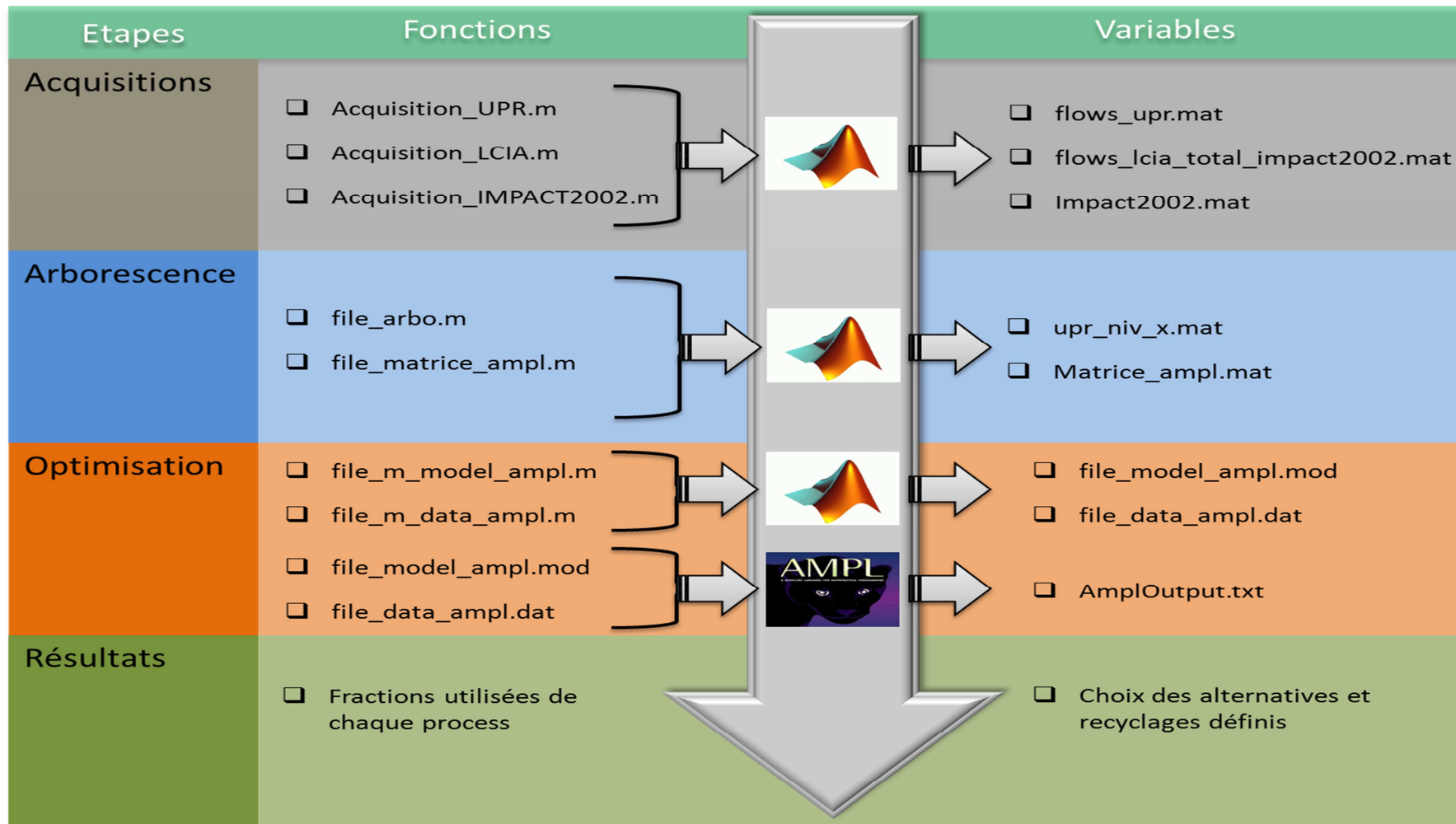


Figure 5 : Vue d'ensemble du programme

8. Validation du modèle

Afin de valider le modèle créé, des tests ont été effectués sur des cas dont les résultats étaient connus à l'avance. Les alternatives et recyclages proposés pour l'étape de validation ne sont pas forcément réalistes. Ils ont été utilisés uniquement dans le but de tester le modèle.

8.1 Cas sans alternatives ni recyclages

Un tel cas permet de valider la méthode de calcul des impacts et le calcul des fractions. Pour ce faire le process choisi a été le numéro 670 qui correspond à « electricity, production mix CH ». N'ayant pas de quoi optimiser, car il n'y a ni alternatives ni recyclages proposés, le solver d'AMPL donne le résultat en presolve. En analysant les résultats ainsi obtenus on peut s'apercevoir que la fraction d'utilisation de tous les process de l'arborescence est identique à celle défini dans Ecoinvent, de plus le calcul de l'impact donne également des valeurs identiques à celles décrites dans Ecoinvent pour le process de base. Ce premier test est donc concluant.

8.2 Cas simple avec alternatives

Afin de tester si le modèle gère bien le choix des alternatives qui lui sont proposées, on propose au cas précédant, 8.1, quelques alternatives. Des alternatives vont être proposées aux différents niveaux, certaines sont intéressantes alors que d'autres non. On teste aussi, si les ratios des alternatives sont bien pris en compte.

Niveau 1 : process 1533 (electricity, at cogen 200KWe diesel SCR) a comme alternative potentielle le process 6221 (electricity, at cogen with biogas engine). Ratio 1/1. Devrait être choisi lors de l'optimisation.

Niveau 1 : Process 2294 (electricity, at wind power plant) a comme alternative potentielle le process 1240 (electricity, at cogen 500KWe lean burn). Ratio 1/1. Ne devrait pas être choisi lors de l'optimisation.

Niveau 2 : process 6169 (biogas, production mix) a comme alternative potentielle le process 6154 (natural gas) mais avec un ration de 1/10. Devrait être choisi lors de l'optimisation.

L'optimisation qu'effectue AMPL avec les alternatives ci-dessus donne les résultats qui étaient attendus. L'optimisation se fait correctement pour le choix des alternatives.

8.3 Cas simple avec recyclages

Afin de tester si le modèle détecte et teste correctement les possibilités de recyclage on met en corrélation quelque déchets et input présents dans le cas 8.1.

Pour ce faire on définit le process 2064 (disposal oil) comme déchet, et le process 1538 (bitumen) comme filière de recyclage. Après optimisation les résultats montrent bien que le recyclage se fait correctement. En effet le déchet est totalement réutilisé pour être valorisé à deux endroits de l'arborescence où il peut remplacer le process 1538 (il y a plus de valorisation possible que de déchets disponible). L'impact est, grâce à ce recyclage, légèrement diminué.

8.4 Cas simple avec alternatives et recyclages

Pour tester si le modèle gère correctement simultanément les alternatives et les recyclages on combine les cas présentés au point 8.2 et 8.3. Après optimisation de ce cas on remarque que les choix opérés par l'optimiseur sont conformes aux attentes.

Ainsi le programme développé semble optimiser les différents cas qui peuvent se présenter de manière correcte. Il est maintenant possible de s'attaquer à des cas plus complexes, comme le cas d'étude qui va être présenté dans la suite de ce travail.

8.5 Application à la pratique

Il a été remarqué dans la pratique que les alternatives proposées sont réellement applicables dans les premiers niveaux et qu'elles subissent beaucoup de contrainte plus on remonte dans l'arborescence. Ainsi l'arborescence devient utile principalement pour les recyclages. Dans le cas d'étude qui suit les alternatives proposées sont appliquées uniquement dans les premiers niveaux de l'arborescence, où il est réellement possible d'agir, alors que la recherche de synergies se fait dans l'arborescence entière.

9. Cas d'étude

9.1 Présentation

Le cas d'étude qui va être analysé ici sera un parc industriel dans lequel le potentiel de créer des synergies est évident, figure 6. Il s'agira d'une industrie de production de diesel à partir de bois (BTL) [13], d'une entreprise de production de plâtre, ainsi qu'une scierie industrielle. Les chiffres des quantités de production des trois industries prises en compte sont tirés de production européennes [11 et 12]. Pour chacune des trois industries, un processus a été défini dans le programme. Il est à noter que dans ce cas d'étude le but n'est pas de s'approcher au plus près d'un cas réel mais bien de tester le programme dans un cas complexe, d'où les approximations lors de la définition des processus, des alternatives ou des recyclages.

Scierie : Le processus scierie est défini approximativement en déterminant sa production, soit : des planches et des portes en bois.

Plâtrerie : La plâtrerie est définie approximativement en déterminant sa production, soit : des panneaux de plâtre à partir de gypse.

BTL : Le processus BTL, permettant de produire du diesel à partir du bois, est défini selon les données obtenues dans le travail de M.Cudilleiro [13].

En annexe 5 une description des produits et quantités de ce processus.

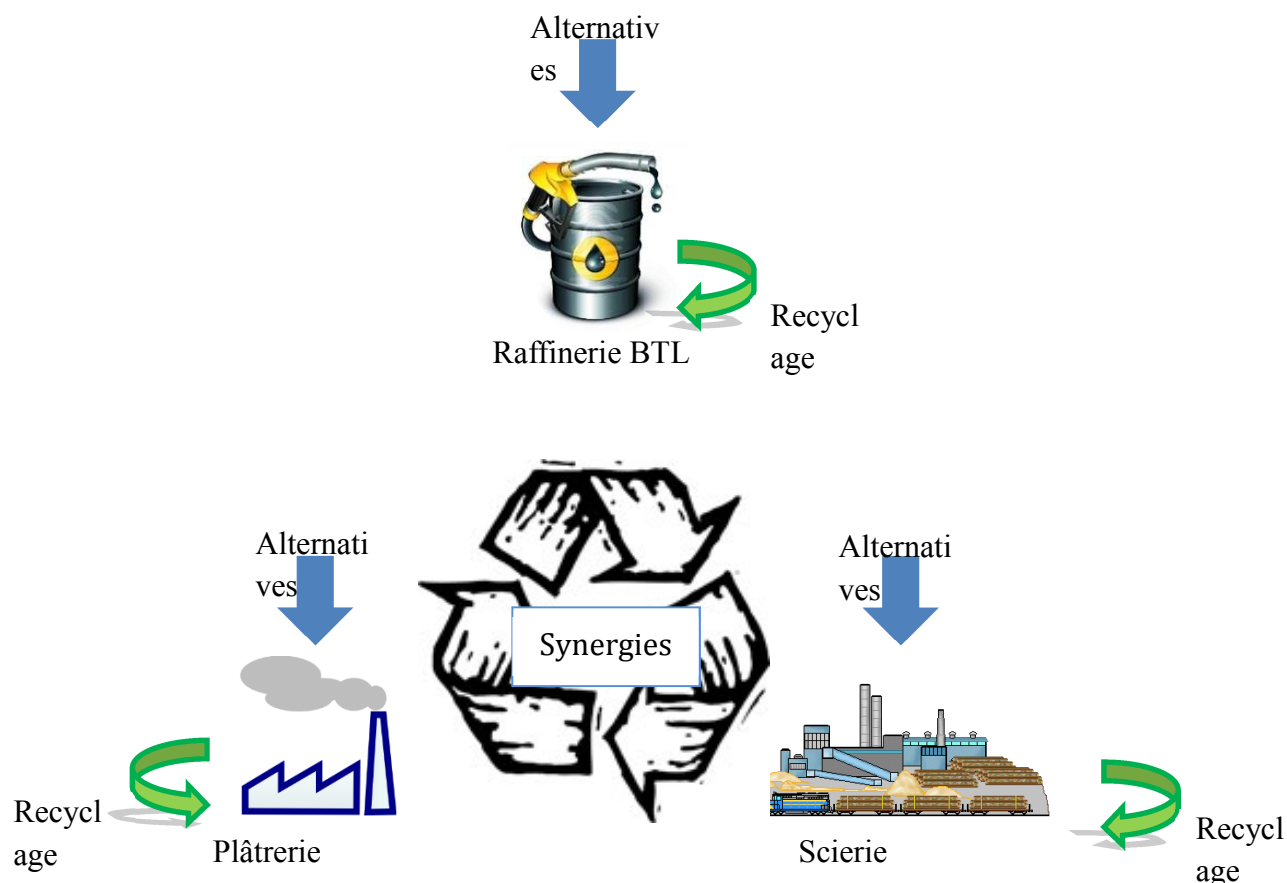


Figure 6 : Parc industriel pour le cas d'étude

Il a été défini une liste d'alternatives pouvant remplacer certains des process présent dans l'arborescence des trois unités de production de notre système, l'annexe 6 présente ces alternatives. Puis une liste de correspondance déchets-matière première a été définie afin de permettre, lors de l'optimisation de notre système, la détection d'éventuelles possibilités de recyclages. La liste des correspondances considérées se trouve en annexe 7. En utilisant les différentes fonctions créées précédemment, une matrice AMPL va pouvoir être construite et elle intégrera les différentes possibilités de substitution ainsi que les recyclages potentiels.

Dans ce cas d'étude on considère que les trois industries sont voisines et que les transports des matières pouvant être recyclées sont négligeables.

9.2 Résultats

9.2.1 Système global non optimisé

Afin de mesurer la réduction de l'impact engendré par l'optimisation du système il faut tout d'abord analyser la situation non optimisée. La figure 7 ci-dessous fait état de la situation de base. Ce résultat coïncide donc avec les valeurs que l'on peut retrouver directement dans la base de données Ecoinvent.

Parc industriel non optimisé

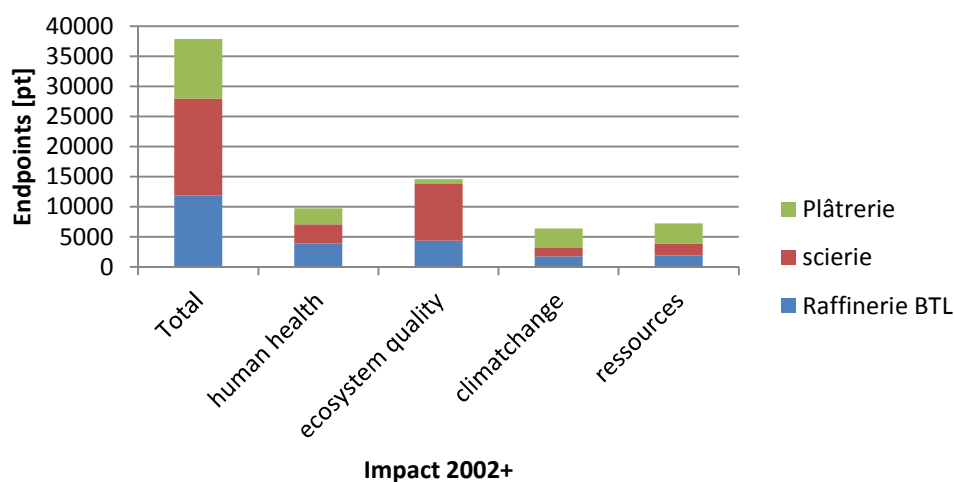


Figure 7 : Système non optimisé

9.2.2 Système « plâtrerie » seul optimisé

Ici l'optimisation se fait pour le sous-système « plâtrerie ». L'optimiseur choisi les alternatives les plus intéressantes et les recyclages internes qui sont possibles. Le résultat de cette optimisation est résumé dans la figure 8 ci-dessous :

Plâtrerie seule

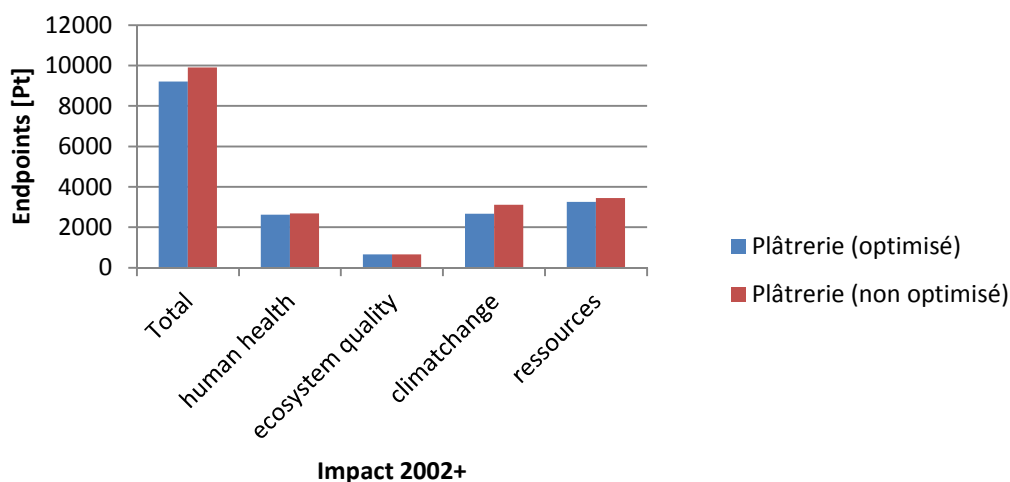


Figure 8 : Plâtrerie optimisé VS non-optimisée

On peut voir que les alternatives proposées permettent de réduire quelque peu l'impact environnemental pour chacune des classes d'impact. En analysant le tableau en annexe 8, il est intéressant de voir que déjà à ce stade le choix des alternatives diffère selon la classe d'impact que l'on considère (somme des classes d'impacts est inférieure l'impact total). On voit donc que selon la classe d'impact que l'on veut optimiser le résultat diffère. Ainsi il pourrait être

intéressant d'ajouter une fonction permettant à l'utilisateur de pondérer les différentes classes d'impact en fonction de l'importance que revêtent les différentes classes d'impact.

9.2.3 Système « scierie » seul optimisé

Ici l'optimisation se fait pour le sous-système « scierie ». Le résultat de l'optimisation de ce sous-système est résumé dans le graphique de la figure 9 ci-dessous :

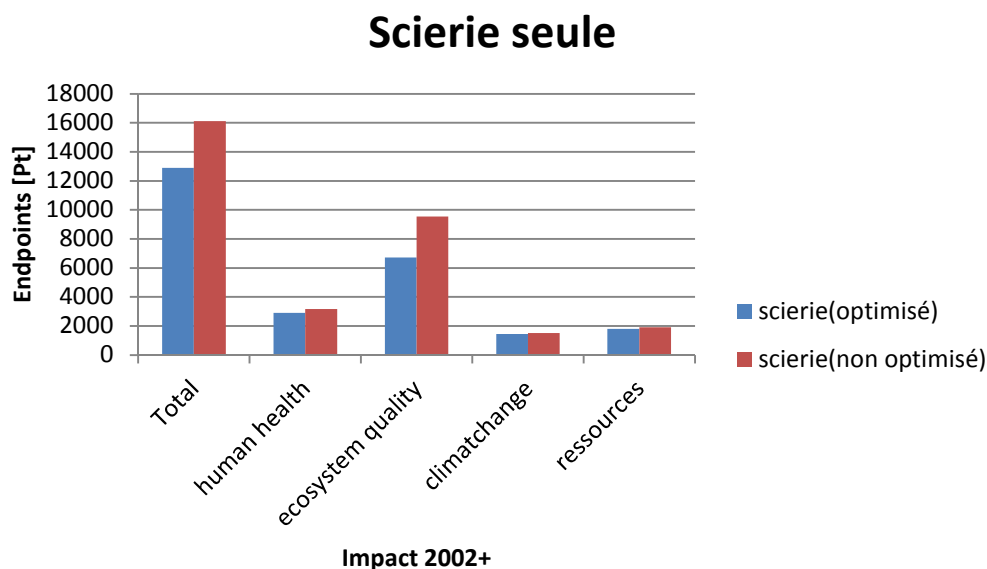


Figure 9 : Scierie optimisée VS non-optimisé

Pour le cas de la scierie seule les alternatives permettent de diminuer l'impact environnemental du système. L'alternative qui permet cette réduction est un séchage du bois à l'air et non plus dans un four. Dans le cas où un séchage au four est obligatoire il peu y avoir une possibilité de récupération de chaleur ailleurs dans le système. Cependant il faudrait ajouter à la matrice correspondances la possibilité de recyclage de déchet de chaleur pour l'utilisation de fours.

9.2.4 Système « raffinerie BTL » seul optimisé

Ici l'optimisation se fait pour le sous-système « raffinerie BTL ». Le résultat de l'optimisation de ce sous-système est résumé dans le graphique de la figure 10 ci-dessous :

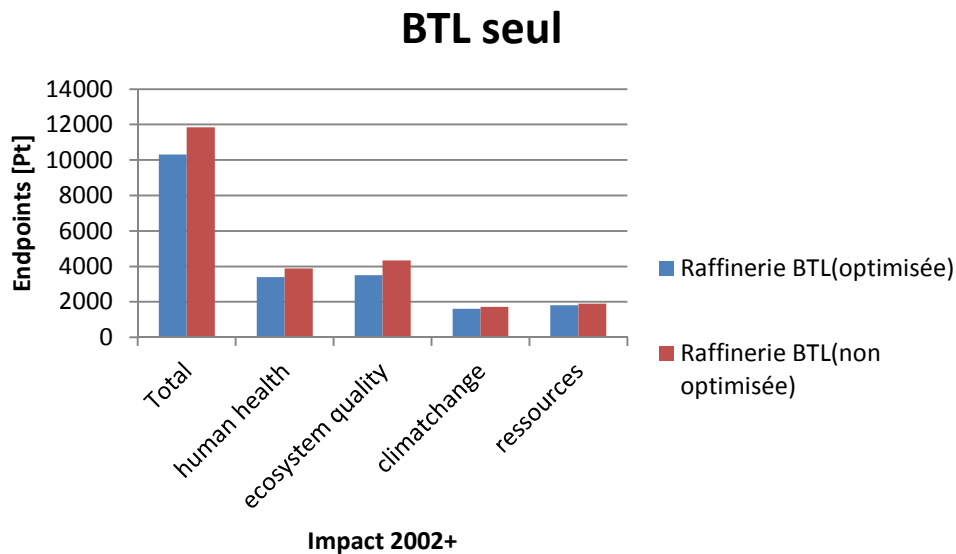


Figure 10 : BTL optimisé VS non-optimisé

On voit que l'impact environnemental du système BTL est significativement réduit grâce aux alternatives proposées à l'optimiseur. Cette réduction est obtenue par la substitution de chips de bois par d'autre d'une qualité différentes (wood chip 40% à la place de wood chip 80%). Cependant dans le cas de la production de BTL il faudrait, avant d'appliquer cette alternative, vérifier si un tel changement dans le processus de production est réalisable.

9.2.5 Système global optimisé

Sans recyclages :

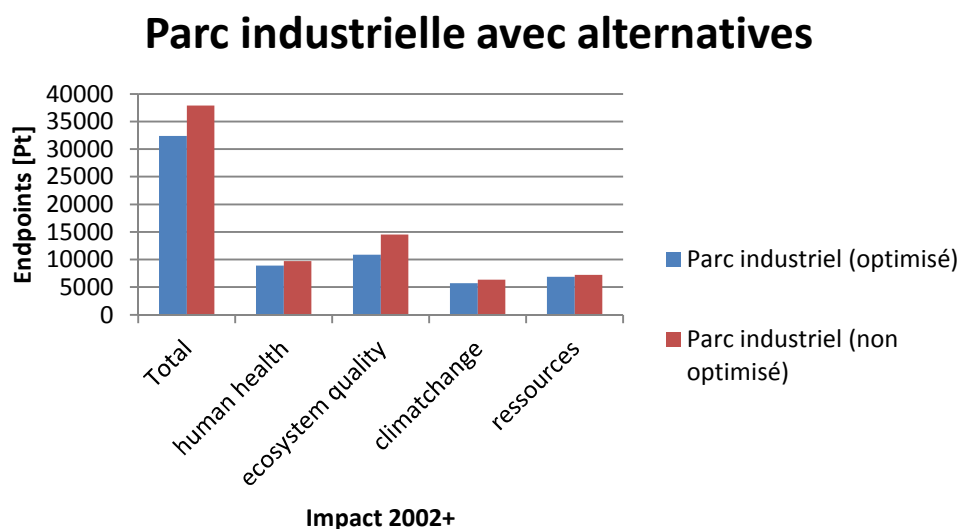


Figure 11 : Parc industriel optimisé avec alternatives mais sans recyclages

Comme déjà remarqué auparavant et comme le montre le graphique ci-dessus, les alternatives permettent de réduire sensiblement l'impact globale du parc industriel, et ce sur toutes les

classes d'impacts. Le résultat en figure 11 représente donc la somme des impacts des trois systèmes industriels séparés. C'est seulement une fois que l'on intègre les possibilités de recyclage que les systèmes vont interagir en s'échangeant des flux.

Avec recyclages :

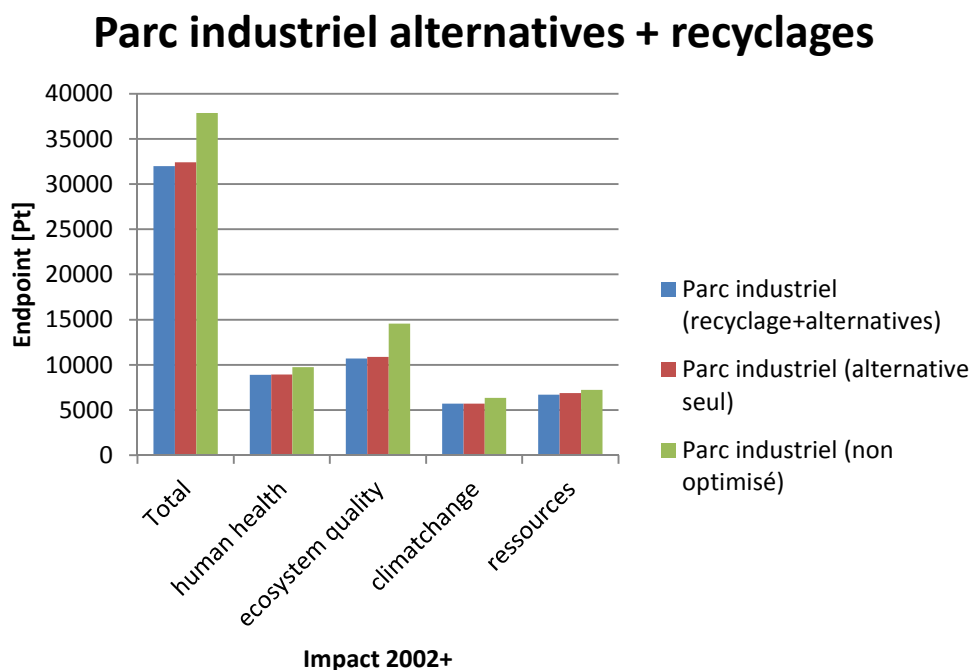


Figure 12 : Parc industriel optimisé avec alternatives et recyclages

Dans ce cas les recyclages permettent de réduire quelque peu l'impact mais de manière peu sensible par rapport à la diminution due aux alternatives.

Il est clair que plus l'optimisation se fait sur un parc industriel étendu et plus les possibilités de recyclages vont être élevées. Ce qui va permettre une diminution encore plus sensible des impacts environnementaux engendrés par les activités industrielles. Cependant dès lors où le système analysé s'étend spatialement les besoins en process intermédiaires pour acheminer les matières recyclables d'un point à l'autre du système vont augmenter et ainsi des process supplémentaires de transports vont apparaître.

10. Perspectives et développements futurs

10.1 Création des bases de données

Afin d'automatiser au maximum l'analyse d'un système par l'outil développé dans ce travail il est nécessaire de mettre sur pied des bases de données pour les alternatives et pour les correspondances entre déchets et matières premières.

Ces deux bases de données présenteront les alternatives et les recyclages possibles pour certains des process. Certains process seront applicables dans toutes les situations alors que d'autres le seront uniquement dans certains cas, ainsi une information supplémentaire concernant le champ

d'applications sera ajouté à chaque alternative proposée. De telles bases de données demandent énormément de travail mais il est possible de les remplir seulement pour certains domaines d'activité, comme l'énergie, pour avoir rapidement une base de donnée utilisable. De plus des travaux, intégrant les SIG [14], pourraient compléter la base de données pour les critères d'intégration.

10.2 Intégration de la fonction coût

Dans les secteurs industriels et économiques le souci de l'impact environnemental des activités est de plus en plus présent mais il est évident que la compétitivité économique reste le souci numéro un. Ainsi il est possible d'ajouter au programme la dimension économique à l'optimisation. Il suffit de rajouter une ligne coût dans la matrice correspondant à chaque process est de résoudre le problème en multi-objectif (moo) (coût-impact environnementale). La fonction permettant d'obtenir les matrices utilisables pour une analyse multi-objectif (coût-impact) a été développée et est présentée en annexe numérique. A l'aide de l'optimiseur moo du LENI il est possible d'obtenir la courbe de Pareto en fonction de ces deux objectifs.

11. Conclusion

De nos jours l'impact qu'a l'homme sur l'environnement devient de plus en plus préoccupant pour l'avenir de notre planète et il se vérifie de plus en plus qu'un système efficace au niveau environnemental sera également très compétitif au niveau économique. Ainsi tout outil permettant d'accroître l'efficacité économique d'un système devient de plus en plus intéressant et demandé.

Dans ce travail l'outil développé est une première approche permettant d'améliorer l'efficacité environnementale d'un système de manière systématique et de la manière la plus automatique possible. L'utilisation des logiciels Matlab et AMPL ont permis d'organiser, de traiter et d'optimiser toutes les données émanant de de base de données d'impact environnementale comme Ecoinvent. Ainsi il est possible de détecter et de mesurer l'efficacité des mesures permettant la réduction de l'impact environnementale, que ce soit par des substitutions de process ou par la création de synergies. Bien que beaucoup de synergies paraissent évidentes, un tel programme peut permettre la détections de synergies qui ne sont pas évidente ou encore qui sont amenée par des substitutions de process qui dans un premier temps ne paraissent que peu intéressantes. L'ajout de la dimension économique à l'optimisation devrait donc pouvoir être un outil de travail très intéressant pour toutes entreprises se préoccupant de son impact environnemental tout en voulant rester le plus compétitif possible.

Le potentiel d'une telle approche couplée aux ACVs classiques semble évident. Cependant le travail demandé est considérable, notamment pour la mise en place de bases de données consistantes pour les substitutions et les synergies.

12. Références

- [1] Erkmann Suren, *Vers une écologie industrielle*, Charles Leopold Mayer, Paris, 2004
- [2] Frischknecht Rolf, et al., *Ecoinvent report*, Ecoinvent center, Dübendorf, 2007
- [3] Frischknecht Rolf, G. Rebitzer, *The ecoinvent database system: a comprehensive web-based LCA database*, Journal of cleaner production, n°13, 1337-1343
- [4] Adoue Cyril, *Mettre en œuvre l'écologie industrielle*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, 2007
- [5] Finnveden Göran, et al., *Recent developments in life cycle assessment*, Journal of environmental management, n°91,1-21, 2009
- [6] Jolliet Olivier, myriam Saadé, Pierre Crettaz, *Analyse de cycle de vie : Comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, 2005
- [7] Sangwon Suh, Shinichiro Nakamura, *Five years in the area of input-output and hybrid LCA*, Int J LCA, n°6, 351-352, 2007
- [8] Système durable, logiciel Presto : www.systemes-durables.com/spip/spip.php?article36
- [9] Base de données ecoinvent : www.ecoinvent.ch
- [10] Fourer Robert, David M. Gay, Brian W. Kernighan, *AMPL a modeling language for mathematical programming*, Pacific Grove, USA, 2003
- [11] Carrière BPB Placo : www.svt.ac-versailles.fr/archives/Lithotheque%20versailles/cormeilles/platre.htm
- [12] Scierie Eigelshoven : www.holz-eigelshoven.de/docs/Eigelshoven_Imagebr_FR.pdf
- [13] Cudilleiro Mathias, *Optimisation thermo-environnementale de bio-carburants de deuxième génération utilisant une ACV well-to-wheel*, EPFL, 2010
- [14] Plancherel Anna, *Valorisation des SIG pour la détection de synergies éco-industrielles*, EPFL, 2006
- [15] Leni development systems team, *Energy technologies*, LENI-EPFL, Lausanne, 2009

13. Remerciements

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide, la patience et l'intérêt de plusieurs personnes. C'est pour cela que j'aimerai remercier tout particulièrement mes encadrants, F.Maréchal, L.Gerber pour leur aide et conseils irremplaçable. Ainsi que Y. Loerincik, G.Massard et S.Erkman pour leur temps et leurs informations.

Un grand merci au grand manitou de pléiades, Trach-Minh Tran, qui me fût d'une aide précieuse pour les problèmes liés à l'utilisation d'AMPL.

Encore un grand merci à la famille et aux amis pour leurs soutiens au quotidien. Notamment A.Grampchamp, A.Stefaniuk, D.Dousse, L.Evequoz, M.Cudilleiro, G.Eyer, G.Liberherr, D.Tran, P.Borer, M.Thomet, L.Bidaud, J.Richon et C.Imfeld pour leur présence lors des pauses café et leur aide.

14. Annexes

Annexe 1 : Structure UPR

flows_upr_new <11146x1195 cell>

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
2	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
3	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
4	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
5	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
6	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
7	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
8	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
9	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
10	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
11	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
12	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
13	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
14	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
15	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
16	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
17	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
18	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
19	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
20	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
21	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
22	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
23	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
24	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
25	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
26	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>

Numéro du produit de référence

Produits composant le produit de référence

flows_upr_new(19,6) <1x1 struct>

Field	Value	Min	Max
Number	511	511	511
Name	'poor concrete, at plant'		
Category	'construction materials'		
Unit	'm3'		
Value	'2.24'		

Annexe 2 : Structure choix

choix <11146x4 cell>

	1	2	3	4
1	<1x1 struct>	[]	[]	[]
2	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
3	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]
4	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
5	<1x1 struct>	[]	[]	[]
6	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
7	[]	[]	[]	[]
8	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]	[]
9	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]
10	[]	[]	[]	[]
11	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]
12	<1x1 struct>	[]	[]	[]
13	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]
14	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
15	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]
16	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
17	[]	[]	[]	[]
18	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]
19	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
20	[]	[]	[]	[]
21	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>
22	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]	[]
23	[]	[]	[]	[]
24	<1x1 struct>	<1x1 struct>	<1x1 struct>	[]

choix(3,2) <1x1 struct>

Field	Value
Number	3
Variation	905
V_entiere	1
V_min	0
V_max	1
ratio_quantite	0.9000

Annexe 3 : Exemple de fichier model pour AMPL

```
set LIST_PROCESS;
set LIST_PROCESS_U;
set LIST_PROCESS_X;
set LIST_PROCESS_I;

param valeur>=0;
param matrice_u {LIST_PROCESS_U,LIST_PROCESS};
param matrice_x {LIST_PROCESS_X,LIST_PROCESS};
param matrice_i {LIST_PROCESS_I,LIST_PROCESS};

var Fraction {l in LIST_PROCESS} >= 0;

minimize Impact: sum {l in LIST_PROCESS,i in LIST_PROCESS_I} Fraction[l] * matrice_i[i,l];

subject to Process_1: sum {l in LIST_PROCESS,u in LIST_PROCESS_U} Fraction[l] * matrice_u[u,l]=valeur;

subject to Process_x0 : sum {x in LIST_PROCESS_X,l in LIST_PROCESS} Fraction[l] * matrice_x['A',l]=0;
subject to Process_x1 : sum {x in LIST_PROCESS_X,l in LIST_PROCESS} Fraction[l] * matrice_x[1,l]=0;
subject to Process_x2 : sum {x in LIST_PROCESS_X,l in LIST_PROCESS} Fraction[l] * matrice_x['C',l]=0;
subject to Process_x3 : sum {x in LIST_PROCESS_X,l in LIST_PROCESS} Fraction[l] * matrice_x['C1',l]=0;
subject to Process_x4 : sum {x in LIST_PROCESS_X,l in LIST_PROCESS} Fraction[l] * matrice_x['A1',l]=0;

subject to min_xo {x in LIST_PROCESS_X,l in LIST_PROCESS} : Fraction['A1'] / matrice_x['A1','A'] <=0.8;
```

Pour plus de détails voir l'annexe numérique.

Annexe 4 : Exemple de fichier data pour AMPL

```
set LIST_PROCESS:=0 A 1 C C1 A1;
set LIST_PROCESS_U:=0;
set LIST_PROCESS_X:=A 1 C C1 A1;
set LIST_PROCESS_I:= IHH IEQ ICC IRE ITOT ;
```

```
param matrice_u :      0      A      1      C      C1      A1      1-C :=
                      0      1      0      0      0      0      0      0 ;
```

```
param matrice_x :
      0      A      1      C      C1      A1      1-C :=
A      -1     1      0      0      0      1/2     0
1      0     -1     1      0      0      0      1
C      0      0      0      1      1/3     -3      1
C1     0      0      0      3      1      -9      0
A1     -2     2      0      0      0      1      0 ; #A1 remplace A avec ratio de 2
```

```
param matrice_i :
      0      A      1      C      C1      A1      1-C :=
IHH     0      0      0      0      0      0      0
IEQ     0      0      0      0      0      0      0
ICC     0      0      0      0      0      0      0
IRE     0      0      0      0      0      0      0
ITOT    0     180    4      5      3      3      0 ; #Lignes des impacts, ici on
                                     #considère l'impact total seul
```

```
param valeur:=1;
```

Pour plus de détails voir l'annexe numérique.

Annexe 5 : Cas d'étude, description du parc industriel

Industrie de production de plaque de plâtre, production par année :

N°EI	Nom	Unité	Valeur
517	Gypsum plaster board	kg	9*10 ⁷

Industrie de production de planche de bois, production par année :

N°EI	Nom	Unité	Valeur
2500	sawn timber, hardwood, planed	m3	7.5*10 ⁴
2507	sawn timber, softwood, planed	m3	7.5*10 ⁴

Chiffres tirés de :

Raffinerie BTL 100 MW(simplifié), diesel à partir de bois, production par année :

N°EI	Nom	Unité	Valeur
2352	wood chips, hardwood	m3	1593244
2356	wood chips, softwood	m3	2253167
2354	wood chips, mixed	m3	4038020
2353	wood chips, mixed	m3	4038020
1942	transport, lorry 20-28t	tkm	25450213
1923	operation, lorry 20-28t, empty	vkm	4665578
693	electricity, production mix UCTE	kWh	3038
458	basalt, at mine	kg	19491145
2347	charcoal, at plant	kg	10969043
468	limestone, milled	kg	10969043
1559	light fuel oil	kg	239209
2221	disposal, inert material	kg	41429231
6574	rape methyl ester	kg	6946983
7091	zinc oxide, at plant	kg	172743
468	limestone, milled	kg	713982
2219	disposal, gypsum	kg	314152
1121	nickel, 99.5%	kg	210
244	aluminium oxide	kg	1103
5836	cobalt, at plant	kg	2
479	silica sand, at plant	kg	8
1978	operation, freight train	tkm	29858074

Annexe 6 : Liste des alternatives pour le cas d'étude

Industrie de production de plaques de plâtre

Process de base		Alternative 1		Alternative 2	
788	electricity, medium voltage, at grid, DE	779	electricity, medium voltage, at grid, CH	725	electricity, high voltage, at grid, DE
1601	light fuel oil, burned in industrial furnace	1589	heavy fuel oil, burned in industrial furnace	-	

Industrie de production de planches de bois

Process de base		Alternative 1		Alternative 2	
2500	sawn timber, hardwood, planed, kiln	2499	sawn timber, hardwood, planed, air	-	
2507	sawn timber, softwood, planed, kiln	2506	sawn timber, softwood, planed, air	-	
664	electricity, medium voltage, production UCTE	606	electricity, high voltage, production UCTE	779	electricity, medium voltage, at grid, CH

Indutrie BTL

Process de base		Alternative 1		Alternative 2	
2352	wood chips, hardwood, u=80%	2351	wood chips, hardwood, from industry, u=40%	-	
693	electricity, production mix UCTE	670	electricity, production mix CH	-	
1942	transport, lorry 20-28t	6116	transport, lorry 28t, rape methyl ester 100%	1944	transport, lorry >28t

Annexe 7 : Liste des correspondances pour les synergies

Process déchet	Process input
2219 disposal, gypsum	526 gypsum, mineral, at mine
2064 disposal, used mineral oil	1589 heavy fuel oil, burned

Il est à noter que la définition des correspondances est plus compliquée que prévue car pour certains déchets des allocations sont déjà définies dans Ecoinvent. Le travail pour définir le ratio de correspondance demande une analyse plus approfondie pour remplir la base de données.

Annexe 8 : Résultats du cas d'études

	Total	human health	ecosystem quality	climatchange	ressources		Somme
Raffinerie BTL(optimisée)	10309.76	3397.06	3501.83	1600.43	1810.44		10309.76
Raffinerie BTL(non optimisée)	11844.8	3880.37	4342.02	1722.27	1900.15		11844.81
scierie(optimisé)	12887.98	2910.7	6719.7	1454.63	1802.95		12887.98
scierie(non optimisé)	16127.7	3163.55	9545.91	1514.46	1903.78		16127.7
Plâtrerie (optimisé)	9213.92	2623.28	657.93	2661.06	3255.99		9198.26
Plâtrerie (non optimisé)	9900.37	2688.97	659.14	3116.05	3436.21		9900.37