Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

ANALYSE DE CYCLE DE VIE COMPARATIVE DE DEUX MODES DE CONDITIONNEMENT ET D'EMBALLAGE D'UNE PURÉE DE POMMES DE TERRE

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
DALEZ, FLORENT

En vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Année académique : 2009 – 2010

Directeur : Prof. M. Degrez

Remerciements

Je tiens à remercier les employés du groupe Delhaize, qui ont eu la patience de répondre à mes nombreuses questions, et sans qui ce mémoire n'aurait pu exister.

Je remercie tout particulièrement Etienne et Mathias Lammerant pour m'avoir accueilli avec tant d'enthousiasme dans leur entreprise ainsi que pour leur aide précieuse.

Je remercie également le directeur de ce mémoire, Mr. Marc Degrez, pour ses conseils judicieux et le temps qu'il m'a consacré.

Enfin, merci à ma famille pour ses encouragements et son soutien tout au long de mon parcours universitaire, même dans les moments difficiles.

Résumé

N.B. Ce résumé est destiné à faciliter la recherche bibliographique. Il n'est pas nécessaire à la bonne compréhension du présent mémoire.

Dans une optique d'évolution vers une activité plus durable du point de vue environnemental, la société Delhaize est ouverte à des démarches telles que l'analyse de cycle de vie. Celle-ci consiste en une évaluation chiffrée de l'impact environnemental d'un produit ou d'un service. La finalité première du présent mémoire est donc l'analyse de cycle de vie (ACV) comparative de deux modes de conditionnement et d'emballage d'une purée de pommes de terre de marque Delhaize.

La méthodologie d'ACV, normalisée par la série ISO 14 040, se décompose en quatre étapes :

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude ;
2. Inventaire des émissions et des extractions ;
3. Analyse de l'impact environnemental ;
4. Interprétation.

Lors de la première étape, la fonction du produit ou service analysé doit être identifiée, ainsi que l'unité fonctionnelle et les limites du système étudié. Dans notre cas d'étude, la fonction a été définie comme étant l'accompagnement en purée de pommes de terre d'un repas quelconque. L'unité fonctionnelle est, quant à elle, une portion de purée pour deux personnes. Fonction et unité fonctionnelle, sans lesquelles la comparaison ne serait pas possible, sont à la base de toutes les étapes de calculs nécessaires à l'élaboration de l'inventaire de cycle de vie, lors duquel toutes les entrées et sorties de matières et d'énergie sont identifiées et quantifiées, et ce pour chaque procédé constitutif du cycle de vie du produit. Pour cela, il est nécessaire d'identifier tous les flux intermédiaires entrants et sortants dans le procédé, ainsi que tous les flux, dits élémentaires, qui traversent les limites du système et qui sont donc échangés avec l'environnement. L'utilisation d'une base de données fournissant des facteurs d'émissions est indispensable pour la quantification de ces flux élémentaires, tant ils sont nombreux. Les inconnues seront contournées par la pose d'hypothèses.

Une fois réalisé, l'inventaire de cycle de vie, ou inventaire des émissions et extractions, rassemble et quantifie sous forme de tableaux toutes les substances émises et extraites, et ce pour les deux alternatives comparées. Il convient dès lors d'agréger et de classifier ces données afin de déduire les dommages environnementaux induits par les émissions et extractions. Pour cela, l'utilisation d'une méthode d'analyse de l'impact environnemental, telle qu'Impact 2002+, est plus que nécessaire. Grâce à celle-ci et à partir des résultats d'inventaire, nous pouvons déterminer, sous réserve des nombreuses hypothèses posées dans les différentes phases de calculs, quelle alternative minimise l'impact sur le milieu naturel, en ce compris l'être humain. L'interprétation des résultats ponctuée d'une analyse de sensibilité nous permet de tirer les conclusions sur l'ensemble de l'ACV opérée. Enfin la démarche est mise en perspective, notamment par une analyse du cycle des coûts.

Table des matières

1. INTRODUCTION 9

2. DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE 11

2.1. CONTEXTE GÉNÉRAL 11
2.2. QUESTION DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSE 11

3. DESCRIPTION DES COUPLES PRODUIT ET EMBALLAGE 13

3.1. LA PURÉE FRAÎCHE 13
3.2. LA PURÉE SURGELÉE 14

4. EMBALLAGE ET CONDITIONNEMENT : NOTIONS ÉLÉMENTAIRES 16

4.1. DÉFINITIONS 16
4.1.1. Emballage et conditionnement 16
4.1.2. Emballage primaire, secondaire et tertiaire 16
4.1.3. Congélation et surgélation 18
4.2. LÉGISLATION EUROPÉENNE 18

5. THÉORIE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE 20

5.1. PRINCIPE GÉNÉRAL ET CADRE INSTITUTIONNEL 20
5.2. DÉFINITION DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE 21
5.3. INVENTAIRE DES ÉMISSIONS ET DES EXTRACTIONS 24
5.3.1. Principe général 24
5.3.2. Base de données d'inventaire de cycle de vie 25
5.3.3. Coproduits et problème d'affectation 26
5.3.4. Résolution des problèmes d'affectation 29
5.4. ANALYSE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL 31
5.4.1. Principe général et premières difficultés 31
5.4.2. Cadre méthodologique de base 32
5.4.3. Méthodes d'analyse de l'impact environnemental 34
5.5. INTERPRÉTATION 39

6. ANALYSE DE CYCLE DE VIE COMPARATIVE 40

6.1. DÉFINITIONS DES OBJECTIFS ET DU CHAMP DE L'ÉTUDE 40
6.1.1. Objectifs de l'étude 40
6.1.2. Champ de l'étude 41
6.2. INVENTAIRE DES ÉMISSIONS ET DES EXTRACTIONS 44
6.2.1. La fabrication de l'emballage primaire 44
6.2.1.1. Alternative 1 : purée fraîche 44
6.2.1.2. Alternative 2 : la purée surgelée 49
6.2.1.3. Comparaison des résultats 51
6.2.2. Emballage secondaire : purée fraîche 53
6.2.3. Emballage secondaire : boite en carton (purée surgelée) 56
6.2.3.1. Le carton ondulé : notions de base 56
6.2.3.2. La production du carton 58
6.2.3.3. Inventaire de production 61
6.2.3.4. Inventaire des émissions et des extractions 67

6.2.4. Procédés de transport ... 69
6.2.4.1. Problèmes d'affectation ... 69
6.2.4.2. Alternative 1 : purée fraîche ... 70
6.2.4.3. Alternative 2 : purée surgelée ... 72
6.2.5. Procédés de stockage réfrigéré ... 74
6.2.5.1. Problème d'affectation ... 74
6.2.5.2. Alternative 1 : purée fraîche ... 75
6.2.5.3. Alternative 2 : purée surgelée ... 77
6.2.5.4. Comparaison des alternatives ... 79
6.2.6. Procédés d'utilisation ... 80
6.2.6.1. Alternative 1 : purée fraîche ... 80
6.2.6.2. Alternative 2 : purée surgelée ... 81
6.2.7. Procédés de traitement de fin de vie ... 82
6.2.7.1. Remarques préliminaires ... 82
6.2.7.2. Alternative 1 : purée fraîche ... 83
6.2.7.3. Alternative 2 : purée surgelée ... 85
6.2.7.4. Comparaison des deux alternatives ... 85
6.2.8. Résultats finaux d'inventaire ... 87
6.3. ANALYSE DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ... 89
6.4. INTERPRÉTATION ... 92

7. PERSPECTIVES ET PISTES DE RÉFLEXION ... 98

7.1. ANALYSE DES COÛTS ... 98
7.2. RECHERCHE D'AMÉLIORATIONS ... 99
7.3. QUESTIONS OUVERTES : PISTES DE RÉFLEXION ... 100

8. CONCLUSION ... 101

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ... 103

Liste des figures

Figure 1. Composants de l'emballage primaire de la purée fraîche.....14
Figure 2. Couple produit-emballage de la purée surgelée.....15
Figure 3. Exemple d'un procédé unitaire dans un système (selon ISO 14 041).....22
Figure 4. Problème d'affectation : coproduits.....27
Figure 5. Problème d'affectation : cotraitement.....28
Figure 6. Recyclage en boucle fermée.....28
Figure 7. Recyclage en boucle ouverte.....29
Figure 8. Extension du système.....30
Figure 9. Méthodologie de l'analyse de l'impact environnemental.....33
Figure 10. Schéma général de la méthode Impact 2002+.....35
Figure 11. Arbre des procédés général.....42
Figure 12. Schéma d'une extrudeuse.....44
Figure 13. Emballage secondaire de la purée fraîche : cageot réutilisable.....53
Figure 14. Schéma de l'utilisation des cageots en plastique (purée fraîche).....54
Figure 15. Carton ondulé double face et « double-double ».....57
Figure 16. Diagramme général du procédé de production.....60
Figure 17. Coefficient d'ondulation.....61
Figure 18. Photographie d'un « dolly ».....71

Liste des tableaux

Tableau 1. Catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002+.....36
Tableau 2. Potentiel de réchauffement global pour un horizon temporel de 500 ans.....37
Tableau 3. Facteurs de caractérisation et unités de dommages utilisés dans Impact 2002+.....38
Tableau 4. Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence pour les deux alternatives étudiées.....41
Tableau 5. Inventaire des émissions par UF de la barquette (purée fraîche).....46
Tableau 6. Inventaire des émissions par UF de la poche (purée surgelée).....50
Tableau 7. Comparaison des deux alternatives (emballage primaire).....52
Tableau 8. Emballage secondaire de la purée fraîche: inventaire des émissions et extractions par UF..... 55
Tableau 9. Masse de la boite en carton ondulé.....62
Tableau 10. Masse des déchets de carton.....62
Tableau 11. Consommation mensuelle des différents composants de la colle.....65
Tableau 12. Consommation d'intrants par mètre carré de carton.....66
Tableau 13. Inventaire de production pour le carton d'emballage secondaire.....66
Tableau 14. Emballage secondaire (purée surgelée) : inventaire d'émissions ramené à une UF.....67
Tableau 15. Inventaire des émissions et extractions du transport réfrigéré.....73
Tableau 16. Procédés de stockage réfrigéré : consommation d'énergie électrique.....79
Tableau 17. Comparaison des législations européenne et suisse : valeurs limites d'émission pour les installations d'incinération de déchets non dangereux.....82
Tableau 18. Inventaire des émissions : procédés de traitement de fin de vie.....86
Tableau 19. Inventaire final des émissions : comparaison des alternatives.....88
Tableau 20. Scores de caractérisation intermédiaire : comparaison des alternatives.....90
Tableau 21. Scores de caractérisation de dommages : comparaison des alternatives.....91
Tableau 22. Comparaison des émissions : procédés de stockage et inventaire total de la purée surgelée.....93
Tableau 23. Inventaire des émissions pour les deux hypothèses de consommation du produit en fonction de sa durée de vie : comparaison sur l'étape de stockage et sur l'ensemble du cycle de vie.....95
Tableau 24. Scores de caractérisation intermédiaire : comparaison des alternatives suivant les hypothèses de consommation du produit en fonction de sa durée de vie.....96

1. INTRODUCTION

Dans le cadre du Master 60 en Sciences et gestion de l'environnement, il est demandé aux étudiants de rédiger un mémoire de fin d'études (MFE). Cet écrit se présente comme l'aboutissement de l'année académique durant laquelle les nombreux aspects de la science environnementale ont été abordés, détaillés et étudiés. Par ailleurs, le développement du présent ouvrage fait appel aux compétences de réflexion, d'analyse et de synthèse, acquises par l'étudiant sur l'ensemble de son parcours universitaire. Ces aptitudes ont été nécessaires à la rédaction du mémoire, qui finalement les rassemble autour d'un seul et même objectif.

Le sujet de ce MFE est le fruit de la collaboration entre l'institution académique qu'est l'Université Libre de Bruxelles et la sphère industrielle, en l'occurrence l'entreprise de distribution alimentaire Delhaize.

L'objectif premier de ce travail est donc l'élaboration d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) comparative pour un produit de grande consommation, à savoir une purée de pommes de terre, sur base des deux modes de conditionnement et d'emballage existanst pour ce produit. Différentes options seront ainsi comparées sur base de leurs impacts environnementaux. Ceci s'inscrit dans la volonté de l'entreprise d'évoluer vers une activité plus durable du point de vue environnemental. Ainsi le secteur de la distribution semble-t-il dépasser la relation première qu'il entretient avec ses clients pour s'engager avec ces derniers vers un mode de consommation plus durable.

L'analyse de cycle de vie est une étude foncièrement technique, abordant de nombreux procédés de production, de transport, de traitement, etc., et nécessitant l'examen des compositions des différents matériaux entrants dans le cycle de vie du produit. Par ailleurs, le nombre de données chiffrées étant particulièrement conséquent, le recours à un outil informatique de traitement des calculs est inévitable.

Ceci traduit l'intérêt que porte l'étudiant aux aspects techniques et scientifiques d'une problématique environnementale telle que celle posée par Delhaize. Ainsi, nous nous placerons dans une optique de neutralité par rapport aux produits analysés et de rigueur mathématique dans le but d'aboutir sur des résultats chiffrés utilisables par la firme pour d'éventuelles communications sur le sujet, auprès de ses clients ou fournisseurs.

Il convient toutefois d'évoquer les limites du présent mémoire. Premièrement, l'étudiant ne prétend en aucun cas se hisser au niveau scientifique d'un polytechnicien. Cet écrit sera développé dans la limite de ses connaissances et acquis en la matière. De plus, les calculs, hypothèses et résultats seront basés sur les informations mises à notre disposition, certaines données confidentielles ne pouvant être divulguées, même dans le cadre de cette étude.

Par ailleurs, cet ouvrage se voudra accessible à tout type de lecteur. Bien que des connaissances scientifiques de base offriront une certaine aisance à la lecture et favoriseront probablement l'intérêt pour le sujet développé, nous tenterons de rédiger cet écrit dans un langage approprié et clair.

Ainsi, l'on commencera par situer le sujet dans son contexte général afin de définir la question de recherche et l'hypothèse en tant que réponse anticipée à cette question. Ensuite, une description générale du produit permettra au lecteur de se familiariser avec celui-ci, avant d'aborder l'analyse détaillée.

Les notions élémentaires nécessaires à la bonne compréhension du sujet seront définies, notamment sur base de définitions légales. On abordera par la même occasion la législation en matière de conditionnement et d'emballage, et plus particulièrement l'emballage de denrées alimentaires.

Ensuite, la théorie de l'analyse de cycle de vie sera développée de manière détaillée, la maîtrise de celle-ci étant essentielle à une mise en pratique efficace débouchant sur des résultats concrets. Une ACV sera donc appliquée aux deux couples formés par la purée de pommes de terre et leurs options d'emballage et de conditionnement respectives, en examinant étape par étape les nombreux procédés constitutifs de leur cycle de vie. Cette partie aboutira sur des conclusions basées sur des résultats chiffrés intermédiaires et finaux, mettant en évidence les impacts environnementaux générés par chaque couple produit-emballage sur l'ensemble de son cycle de vie.

Enfin, nous poursuivrons la réflexion sur le sujet du mémoire par une mise en perspective de celui-ci. L'ACV se concentrant majoritairement sur la dimension environnementale de la problématique, il convient d'en confronter les résultats à la réalité économique. Des pistes d'amélioration du travail effectué seront proposées. Ce chapitre sera clôturé par une série de questions ouvertes sur les aspects du problème qui n'ont pu être abordés dans cet écrit, mais pouvant donner lieu à de nouvelles études ou recherches.

Finalement, le mémoire s'achèvera sur une conclusion résumant le travail accompli avec un certain recul critique, ponctuée d'une vision personnelle générale.

2. DESCRIPTION DE LA PROBLÉMATIQUE

2.1. Contexte général

L'analyse de cycle de vie est un outil permettant d'évaluer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service tout au long du cycle de vie de ce dernier (cfr. infra). Le cycle de vie comprend de nombreuses étapes depuis l'extraction des matières premières nécessaires à la production jusqu'à la fin de vie du produit.

Pour réaliser une telle étude, il faut une base tangible, c'est-à-dire un produit ou service réel à analyser. Il serait peu pertinent de réaliser cette analyse sur un produit hypothétique ou inventé. Un produit commercialisé, même d'apparence simple, est généralement le fruit de processus de production et de mécanismes de gestion complexes. Tout l'intérêt d'une analyse de cycle de vie est qu'elle soit utile à l'organisation qui la demande ou aux personnes qui la réalisent, particulièrement dans le cadre de l'aide à la prise de décision. Pour effectuer une telle analyse dans le contexte du présent mémoire de fin d'étude, il était donc nécessaire de trouver un produit ou un service existant sur le marché.

La société Delhaize Group, soucieuse de l'impact de ses activités sur l'environnement, est ouverte à ce type de démarche. En effet, « *le groupe s'engage à offrir à ses clients une expérience d'achat adaptée à chacun de ses marchés, à créer de la valeur ajoutée et à respecter des normes élevées en matière sociale,* ***environnementale*** *et éthique* »[1]. L'entreprise a donc accepté l'étude d'un produit de marque propre (label Delhaize) sous forme d'une analyse de cycle de vie comparative d'une purée de pommes de terre et des deux modes de conditionnement, en ce compris l'emballage, qui la caractérisent.

Rappelons que cette dernière est réalisée dans le cadre académique d'un mémoire ; il ne s'agit nullement d'une gestion de projet ou d'une étude commandée à des fins commerciales.

2.2. Question de recherche et hypothèse

La question de départ de cet écrit s'impose d'elle-même :

« Quel mode de conditionnement et d'emballage de la purée de marque Delhaize minimise l'impact environnemental global du produit ? »

Une sous-question découle assez naturellement de cette question recherche :

[1] *Profil du groupe Delhaize*, site internet de Delhaize Group, adresse URL : http://www.delhaizegroup.com/divclassdg_MenuText_RedTHEGROUPdiv/DelhaizeataGlance/tabid/84/language/fr-FR/language/fr-fr/Default.aspx

« Du point de vue environnemental, quelle incidence a chaque option de conditionnement et d'emballage sur le cycle de vie du couple produit-emballage ? »

Nous tenterons de répondre à ces questions par une étude approfondie du sujet, par l'utilisation de méthodologies et de théories adéquates ainsi par la mise en pratique de celles-ci dans le but d'obtenir des résultats chiffrés utilisables pour d'hypothétiques conclusions.

L'hypothèse est une réponse anticipée à la question de recherche. Elle sera formulée comme suit :

« L'une des deux options de conditionnement et d'emballage minimise effectivement l'impact environnemental global du couple produit-emballage. »

3. DESCRIPTION DES COUPLES PRODUIT ET EMBALLAGE

Avant d'aborder l'analyse de cycle de vie proprement dite, il convient de connaître des caractéristiques générales des deux couples de produit et d'emballage comparés. Une présentation sommaire est faite ici pour familiariser le lecteur avec les articles étudiés.

3.1. La purée fraîche

La purée de pommes de terre fraîche de marque Delhaize est un article que l'on retrouve au rayon des plats préparés frais. Elle est donc stockée en supermarché dans un espace **réfrigéré** à 4°C.

Son emballage primaire se compose d'une **barquette** transparente **en polypropylène** qui contient la purée, fermée par un **film plastique** transparent composé d'un mélange de polyamide et de polyéthylène. Cet emballage est dépourvu de toute impression. Autour de ce contenant se trouve un **étui en carton**, qui peut être qualifié de suremballage (cfr. infra) car il ne contient pas réellement le produit. Il remplit par contre la fonction de présentation du produit (soutien commercial) et comporte la totalité des informations obligatoires telles que la date limite de consommation, le numéro de référence du lot, le « poids » net, la composition (ingrédients), la valeur nutritive moyenne par cent grammes, les instructions de conservation, etc. ainsi que le code barre, le cigle « point vert », les instructions de préparation, etc.

La barquette et le film sont prévus pour une **utilisation** au four à micro-ondes, qui est le mode de préparation prescrit par le fabricant. Cet emballage contient 450 grammes de purée de pommes de terre, soit deux portions d'une personne en accompagnement d'un repas.

Les photos ci-dessous représentent les différents composants de l'emballage primaire du produit tel que vendu en magasin :

Figure 1. Composants de l'emballage primaire de la purée fraîche
(En haut à gauche : barquette PP ; en haut à droite : film PA/PE ; en bas : étui en carton)

3.2. La purée surgelée

La purée de pommes de terre surgelée de marque Delhaize est, comme son nom l'indique, un article disponible au rayon des produits surgelés. Elle est de ce fait stockée en supermarché dans un espace réfrigéré à maximum –18°C.

Son emballage primaire se compose d'une **poche** souple transparente en **polyéthylène** qui assure toutes les fonctions : contenance et protection du produit, présentation commerciale, support des informations légalement obligatoires (date limite de consommation, référence du lot, instructions de conservation, etc.) dont certaines sont spécifiques à un produit congelé ou surgelé (cfr. 4.1. Définitions), comme la mention d'interdiction de recongeler un produit décongelé.

La poche contient 750 grammes de purée de pommes de terre, soit trois à quatre portions d'une personne en accompagnement d'un repas. Deux modes d'utilisation sont prescrits par le fabricant : réchauffage à la casserole ou au four. L'emballage n'est donc pas prévu pour être utilisé durant la préparation du produit et sera donc ôté avant celle-ci.

La photo ci-dessous représente le couple produit et emballage, tel que vendu en supermarché :

Figure 2. Couple produit-emballage de la purée surgelée

L'emballage primaire n'est pas le seul emballage du produit. En effet, d'autres emballages de groupage et de transport sont prévus. Ces notions seront définies au chapitre suivant (cfr. 4. Emballage et conditionnement : notions élémentaires). De même, plus d'informations sur la composition exacte des matériaux utilisés seront développées dans l'analyse de cycle de vie (cfr. 6.2. Inventaire des émissions et extractions).

4. EMBALLAGE ET CONDITIONNEMENT : NOTIONS ÉLÉMENTAIRES

4.1. Définitions

4.1.1. Emballage et conditionnement

Bien que les deux termes soient souvent confondus, l'emballage étant alors considéré comme l'un des aspects du conditionnement d'un produit, nous opérerons une distinction entre les deux vocables dans le cadre de ce mémoire.

Ainsi, l'article 3 de la directive 94/62/CE relative aux emballages et déchets d'emballages définit le terme « **emballage** » comme étant « *tout produit constitué de matériaux de toute nature, destiné à contenir et à protéger des marchandises données, allant des matières premières aux produits finis, à permettre leur manutention et leur acheminement du producteur au consommateur ou à l'utilisateur, et à assurer leur présentation* »[2]. Par ailleurs, le mot conditionnement n'est jamais utilisé dans cette directive. Nous retiendrons cette définition pour la suite de l'étude.

L'encyclopédie Larousse propose quant à elle une définition technique du **conditionnement** en tant que « *réglage de la température et de l'humidité d'une matière première pour la placer dans les conditions de traitement les plus favorables* »[3]. C'est dans cette optique que nous considèrerons cette notion. Ainsi, lorsque l'on abordera le conditionnement, c'est bien des conditions de température et d'humidité dont il s'agira. Concrètement, cela comprend le stockage et le transport réfrigéré (4°C pour la purée fraîche ou –18°C pour la purée surgelée) des couples produit-emballage analysés.

4.1.2. Emballage primaire, secondaire et tertiaire

L'on distingue trois familles d'emballage, chacune ayant un rôle particulier et se différenciant des autres par sa relation au produit.

L'**emballage primaire** constitue l'emballage de vente. En couple avec le produit, il constitue une **unité de vente** destinée à l'utilisateur final. Sa fonction première est de contenir et de protéger le produit. Il est donc en **contact direct** avec celui-ci. En plus de la protection, l'emballage primaire remplit d'autres fonctions : il doit assurer une conservation optimale du produit, être un soutien commercial (marketing) ainsi qu'un support pour l'information obligatoirement présente, en fonction du type de contenu (cfr. infra). En ce qui concerne les denrées alimentaires, l'emballage primaire doit présenter des fonctions plus précises :

---

[2] Directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil, du 20 décembre 1994, relative aux emballages et aux déchets d'emballages, article 3

[3] *Définition de conditionnement*, Encyclopédie Larousse en ligne, adresse URL : http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/conditionnement/36020

- Conserver les propriétés gustatives, olfactives et visuelles de l'aliment ;
- Assurer une hygiène garantissant la sécurité alimentaire ;
- Protéger des agressions externes probables (physiques et chimiques) ;
- S'adapter aux modes de conditionnement ;
- Satisfaire certaines exigences concernant l'utilisation, par exemple l'ergonomie, l'ouverture facile ou dans certaines cas une résistance à des conditions de températures extrêmes d'utilisation (le froid avec la surgélation, le chaud avec le passage dans un four par exemple).

L'**emballage secondaire** est un emballage de **groupage**. Il rassemble plusieurs unités de vente pour constituer des lots. Ce groupe de produits peut être vendu tel quel à l'utilisateur final, on parlera alors de multipack[4], ou servir à des fins logistiques. L'emballage secondaire peut être ôté de l'unité de vente sans en modifier les caractéristiques. Ainsi, par exemple, le film plastique regroupant huit cannettes de boisson vendues directement en magasin est un emballage secondaire au même titre que la boite en carton ondulé contenant dix paquets de sel et se trouvant dans le stock non visible. Dans le cas du multipack, l'emballage secondaire pourra également remplir des fonctions de soutien commercial (attraction du consommateur) et d'information. Dans le cas de denrées alimentaires, il devra éventuellement s'adapter au mode de conditionnement (cas de produits réfrigérés ou surgelés).

L'**emballage tertiaire** est un emballage servant au **transport**. Il regroupe de nombreux articles ou groupes d'articles (dans un emballage secondaire) pour former une unité de transport, facilitant la manutention et limitant de ce fait le risque de dégradation des produits. Dans le cas de denrées alimentaires, il devra également s'adapter au mode de conditionnement (cas de produits réfrigérés ou surgelés). L'exemple le plus communément rencontré est probablement la palette.

Le **suremballage** peut-être défini comme un supplément d'emballage qui n'appartient à aucune des trois familles décrites ci-dessus. Il n'est jamais en contact direct avec le produit et ne joue aucunement un rôle de groupage ni n'est indispensable au transport. Il assure le plus souvent des fonctions d'ergonomie ou de soutien commercial grâce à un certain esthétisme. Il vient donc généralement compléter l'emballage primaire. En guise d'exemple, l'on peut citer un tube de dentifrice qui, couramment, est lui-même emballé dans une boite en carton parallélépipédique. Le tube est facilement identifié comme étant l'emballage primaire, mais le carton ne contient pas le produit ni ne sert à quelconque groupage. Tout au plus permet-t-il une disposition plus ordonnée, plus géométrique dans un emballage secondaire. Cet étui est donc un cas typique de suremballage.

En conclusion, l'emballage d'un produit ne se résume pas à la partie primaire. De plus, la nature du produit (alimentaire, non alimentaire), ses propriétés physiques (masse volumique, volume, etc.) et chimiques (acide, basique, oxydant), son conditionnement (température ambiante, réfrigération, surgélation), ainsi que son utilisation (emballage inclus ou non dans l'utilisation du couple produit-emballage) ont des conséquences non négligeables sur les caractéristiques de l'emballage.

[4] Terme utilisé par les organismes belges de promotion et de gestion du recyclage Val-I-Pack et Fost Plus

Mentionnons également les contraintes techniques et économiques qui, elles aussi, influencent le choix d'un emballage.

4.1.3. Congélation et surgélation

S'appliquant aux **denrées alimentaires**, les termes surgélation et congélation sont souvent confondus. Pourtant, il existe une distinction. Ainsi, la Directive européenne 89/108/CEE définit les aliments surgelés comme étant « *des aliments qui sont soumis à un processus, dit de "surgélation", par lequel la zone de cristallisation maximale est franchie aussi rapidement que nécessaire, ayant pour effet que la température du produit est maintenue – après stabilisation thermique – sans interruption à des valeurs inférieures ou égales à -18 °C* »[5] et précise que « *la température des aliments surgelés doit être stable et maintenue, dans tous les points du produit, à* ***-18°C ou plus bas*** »[6]. Cependant, le texte de la directive associe à maintes reprises les termes congélation et surgélation, décrivant notamment la surgélation comme étant une technique particulière de congélation.

Néanmoins, une différence existe et peut être trouvée dans l'*Accord relatif aux Transports internationaux de denrées Périssables et aux engins spéciaux à utiliser pour ces transports* (ATP). Cet accord, entré en vigueur en 1976 et dont la dernière mise à journée date de 2006, ratifié par la totalité de l'actuelle Union Européenne ainsi que par les Etats-Unis et la Russie, prévoit une distinction entre aliments surgelés, stockés à -18°C, et aliments congelé, stockés à -12°C. Ainsi, certains pays, comme le Danemark, interdisent les produits congelés.

Rappelons que l'un des deux produits étudiés dans cet écrit est bien un **purée surgelée**.

4.2. Législation européenne

Le thème des emballages touchant de nombreux secteurs, tant en ce qui concerne leur production que leur utilisation, ainsi que leur fin de vie, la législation européenne en la matière est assez abondante.

Ainsi, citons la **directive 94/62/CE** relative aux emballages et déchets d'emballages qui définit la notion d'emballage (cfr. supra) et dicte des exigences, dites essentielles, portant sur la composition et le caractère réutilisable et valorisable des emballages, dont la première stipule que *« l'emballage sera fabriqué de manière à limiter son volume et son poids au minimum nécessaire pour assurer le niveau requis de sécurité, d'hygiène et d'acceptabilité aussi bien pour le produit emballé que pour le consommateur* »[7]. En ce qui concerne la **composition** des emballages, la directive prévoyait notamment des limites maximales de concentration en métaux lourds à atteindre par niveau, dont le

[5] Directive 89/108/CEE du Conseil, du 21 décembre 1988, relative au rapprochement des législations des États membres concernant les aliments surgelés destinés à l'alimentation humaine, article premier.
[6] Op. Cit., article 5
[7] Directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil, du 20 décembre 1994, relative aux emballages et aux déchets d'emballages, annexe II, premier alinéa

dernier de 100 parties par millions (ppm) en poids devait être atteint en 2001. Enfin, elle propose également un système d'**identification** des matériaux de composition, basé sur une numérotation de ceux-ci ou une abréviation du nom du matériau. Ainsi, par exemple, le polypropylène est identifié par le numéro 5 et par l'abréviation PP. Les actes modificateurs 2004/12/CE et 2005/20/CE n'ont pas révisé la définition d'emballage ni les exigences sur la composition et l'identification.

La protection du consommateur est également strictement réglementée en Union Européenne. Ainsi, la législation concernant la **sécurité alimentaire** est très développée et s'intéresse entre autres aux matériaux pouvant entrer en contact avec les aliments.

Nous pouvons dès lors citer la **directive 2002/72/CE** concernant les matériaux et objets en **matière plastique** destinés à entrer en **contact avec les denrées alimentaires**[8]. Celle-ci établit une liste des monomères et des additifs autorisés dans la fabrication d'objets destinés au contact avec les aliments (il ne s'agit cependant pas uniquement des emballages). Pour de nombreuses substances autorisées, la directive impose des restrictions sous la forme de limites maximales de migration vers les denrées, exprimées en milligrammes de substance par kilogramme de denrée (mg/kg). Dans le cas des emballages, ces limites sont exprimées en milligrammes de substances par décimètre carré de surface d'emballage (mg/dm²). Par exemple, le propylène est autorisé pour le contact alimentaire et n'est soumis à aucune restriction. Cette directive a été plusieurs fois mise à jour par les actes modificateurs 2004/19/CE, 2005/79/CE, 2007/19/CE et 2008/39/CE, notamment en ce qui concerne les substances autorisées et les restrictions sur celles-ci.

Les aliments surgelés sont également réglementés par la **directive 89/108/CEE** qui définit la notion de surgélation pour une denrée alimentaire (cfr. supra). Elle impose notamment le maintien d'une température inférieure ou égale à -18°C (-20°C pour les crèmes glacées) en tous points du produit lors de son stockage et prévoit une tolérance pour des écarts de température durant le transport ne dépassant pas 3°C. Elle précise également que la dénomination de vente doit être accompagnée par la mention « surgelé ».

Enfin, citons la **directive 2000/13/CE** concernant l'étiquetage et la présentation des denrées alimentaires[9] qui impose une liste des mentions obligatoires de l'étiquetage, et plus spécifiquement pour l'étiquetage des denrées périssables, qui doivent comporter la **date limite de consommation**, les conditions particulières de conservation, le nom ou la raison sociale et l'adresse du fabricant ou du conditionneur ou d'un vendeur, le lieu d'origine ou de provenance, le mode d'emploi et la mention du titre alcoométrique volumique pour les boissons titrant plus de 1,2 % d'alcool en volume.

[8] Directive 2002/72/CE de la Commission, du 6 août 2002, concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaires.
[9] Directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil du 20 mars 2000 relative au rapprochement des législations des États membres concernant l'étiquetage et la présentation des denrées alimentaires ainsi que la publicité faite à leur égard.

5. THÉORIE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

5.1. Principe général et cadre institutionnel

« L'analyse du cycle de vie a pour but d'évaluer l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie »[10]. Comme l'indique cette citation, l'expression « analyse du cycle de vie » (« Life Cycle Assessment » en anglais) décrit une approche large, recouvrant les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie, c'est-à-dire depuis l'extraction des matières premières jusqu'à son élimination ou son recyclage. Les termes ***fonction***, ***impact*** et ***système*** revêtent une importance toute particulière que nous tenterons de mettre en évidence dans la suite de ce chapitre.

Une variante de l'analyse de cycle de vie est l'éco-profil, dont l'inventaire des consommations d'énergie et de matières ainsi que des émissions s'arrête à la sortie de l'usine. En anglais, on parle alors de « craddle to gate analysis »[11], qui diffère de l'une analyse complète, nommée quant à elle « craddle to grave analysis »[12].

La finalité première d'une ACV – pour Analyse du Cycle de Vie – est d'être un outil d'aide à la décision permettant au producteur de bien ou de service de faire un bilan, comparatif ou non, de l'impact environnemental de son produit ou service pour ensuite définir des priorités d'action en matière d'environnement, et ce, en fonction de l'ensemble des mesures réalisables et des contraintes, notamment économiques.

Historiquement, trois organisations se sont particulièrement impliquées dans le développement méthodologique des analyses de cycle de vie : l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO – International Organization for Standardization), la Société de Toxicologie et Chimie Environnementales (SETAC) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), ce dernier ayant lancé en 2002 l'*Initiative pour le cycle de vie* (« *Life Cycle Initiative* »). L'ISO a notamment développé des normes consacrées au management environnemental, référencées par la série ISO 14000, dont l'une d'entre elles établit les lignes directrices pour la pratique des ACV (ISO 14040) et est complétée par d'autres normes détaillant les quatre étapes d'une ACV. Les notions théoriques suivantes ainsi que la démarche méthodologique du présent mémoire se basent donc sur les normes ISO, et ce, dans l'optique d'une approche normalisée et de résultats utilisables hors du contexte académique.

Selon la norme ISO, l'ACV se décompose en quatre étapes :

---

[10] JOLLIET O., SAADE M. et CRETTAZ P., *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, page 7

[11] Littéralement : « analyse du berceau à la porte »

[12] Littéralement : « analyse du berceau à la tombe »

- la définition des objectifs et du champ de l'étude ;
- l'inventaire des émissions et des extractions ;
- l'analyse de l'impact environnemental ;
- l'interprétation.

Un tableau récapitulatif des normes ISO en matière de management environnemental et d'analyse de cycle de vie est disponible en annexe.

5.2. Définition des objectifs et du champ de l'étude

La définition des objectifs et du champ de l'étude est la première étape d'une ACV. Elle est avant tout descriptive et non technique. Elle peut paraître fort simple, mais est essentielle à la qualité de l'étude. Comme l'indique son nom, cette phase doit premièrement décrire les objectifs de l'analyse. La norme ISO 14 040 précise que « *l'**objectif** d'une analyse de cycle de vie doit indiquer sans ambiguïté l'application envisagée, les raisons conduisant à réaliser l'étude, et le public concerné, c'est-à-dire les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats de l'étude* ».

Le **champ de l'étude** doit, quant à lui, et toujours selon la norme ISO, définir les éléments suivants :

- les fonctions du produit, service ou système étudié (ou des produits, services ou systèmes dans le cas d'étude comparative) ;
- l'unité fonctionnelle ;
- le système à étudier ;
- les frontières du système ;
- les hypothèses ;
- les limitations.

Dans le cas d'une étude comparative, il est impératif de comparer les produits, systèmes ou services sur base d'une **fonction commune**. Seules les alternatives réalisant une fonction équivalente sont comparables. De plus, la fonction sert de base à la détermination de l'unité fonctionnelle et des limites du système, autres points indispensables de la définition du champ d'étude. Parfois, un système peut présenter plusieurs fonctions (système multifonctionnel). On tentera alors de distinguer la fonction principale des fonctions secondaires. Enfin, lorsqu'une ACV porte sur une **partie d'un système**, on se reportera à la fonction de l'ensemble du système.

Lorsque la fonction est identifiée, on peut en dériver l'**unité fonctionnelle** (UF) qui quantifie la fonction du système, du service ou du produit et sert de base de comparaison entre les différentes alternatives. L'unité fonctionnelle est « *une grandeur, définie en cohérence avec les objectifs de l'étude, qui doit être mesurable et additive et n'est donc pas un rapport : l'impact de deux unités*

fonctionnelles doit être le double de l'impact d'une unité fonctionnelle »[13]. A nouveau, lors d'une ACV portant sur un composant d'un ensemble, on se référera dans l'UF à la fonction de l'ensemble.

Ensuite, pour une unité fonctionnelle définie, on mesure pour chaque alternative le **flux de référence** (ou ratio d'"utilisation équivalente"), qui correspond aux quantités de produits ou de services nécessaires pour remplir la fonction. Afin d'illustrer cette notion, prenons l'exemple d'une fonction de séchage des mains : pour la réaliser, on aura besoin d'une serviette en tissu (première alternative) ou de deux serviettes en papier (seconde alternative).

Lorsque fonction, unité fonctionnelle et flux de référence sont déterminés, le système peut être modélisé. En effet, le système peut être défini comme « *un ensemble d'éléments en interaction dynamique »*[14], les éléments étant des procédés (par exemple : des procédés industriels). La démarche de modélisation consiste donc en la mise en interrelation de différents **procédés unitaires**, chacun accomplissant une activité unique ou un groupe d'opérations, reliés entre eux par des **flux de produits intermédiaires** ou de **déchets** à traiter. De plus, le système échange des flux de matières et d'énergie avec l'environnement (et des flux de produits avec l'économie). Dans la modélisation, les procédés unitaires sont donc reliés à l'environnement par des **flux élémentaires** (et à l'économie par des flux de produits). Les flux élémentaires entrants sont typiquement l'utilisation des sols, l'extraction de matières et l'extraction d'énergie primaire. Les flux élémentaires sortants correspondent aux émissions, polluantes ou non, dans l'eau, l'air et le sol.

La figure ci-dessous illustre la démarche, telle que prescrite par la norme ISO 14 041 :

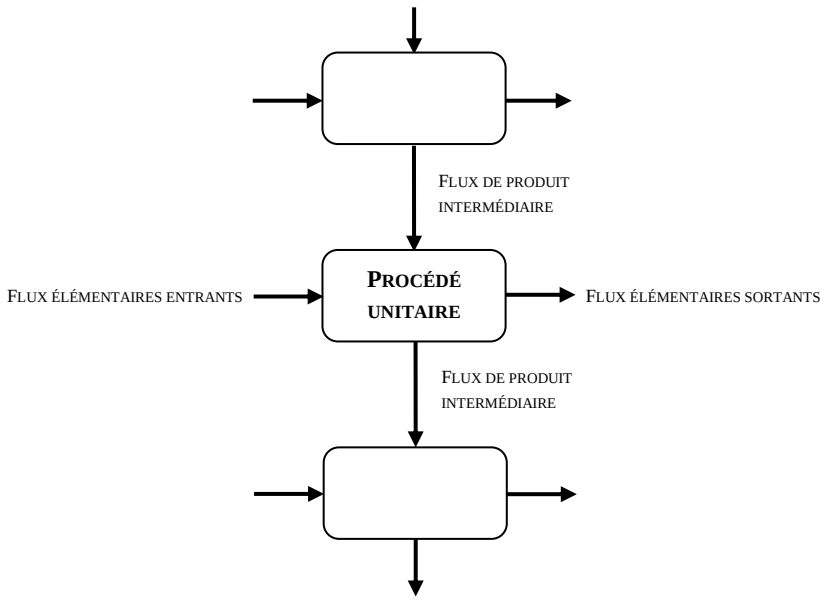


Figure 3. Exemple d'un procédé unitaire dans un système (selon ISO 14 041)
Source : JOLLIET et al. (2005)

[13] JOLLIET O., SAADE M. et CRETTAZ P., *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, page 22
[14] JOLLIET O., SAADE M. et CRETTAZ P., *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, page 30

Lorsque tous les procédés unitaires ont été identifiés et schématisés, on obtient un diagramme général de tous les flux échangés dans le système, appelé **arbre des procédés** (« flow chart » en anglais), qui permet de visualiser les différentes alternatives ou scénarios étudiés dans l'analyse du cycle de vie.

Il va sans dire que tous les procédés unitaires ne comportent pas nécessairement de flux élémentaires entrants. En effet, par exemple, le procédé de transformation d'un produit semi-fini peut ne consommer aucune matière extraite ni vecteur d'énergie primaire. Il ne sera donc relié à l'environnement que par les flux élémentaires sortants (car il est néanmoins peu probable qu'il ne soit source d'aucune émission). Par contre, il sera évidemment relié au reste du système par des flux de produits intermédiaires. Sur un arbre des procédés, les étapes d'extractions des matières premières sont typiquement des étapes qui comportent des flux élémentaires entrants.

Enfin, il convient de fixer les **limites du système**, c'est-à-dire déterminer les modules ou procédés à considérer ou à exclure pour la modélisation et l'inventaire qui suivra (cfr. infra). Par définition, tous les procédés nécessaires à la réalisation de la fonction doivent être pris en compte dans l'ACV, du berceau à la tombe (« craddle to grave » en anglais). Idéalement, la sélection se fait grâce à l'analyse de l'arbre des procédés et doit couvrir l'ensemble du cycle de vie : extraction des matières premières, fabrication des équipements (par exemple : des machines) et des infrastructures, la production du produit proprement dit, l'utilisation du produit et le traitement des déchets (réutilisation, recyclage ou élimination). Cependant, dans certains cas, un ou plusieurs procédés unitaires peuvent être exclus. Afin de fixer les limites avec cohérence, trois règles[15] doivent être respectées :

- Règle n°1 : *les limites du système doivent couvrir la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios*. Les limites du système sont donc des limites fonctionnelles.

- Règle n°2 : *sont retenus dans le système les procédés qui contribuent sensiblement à la consommation d'intrants ou d'énergie ou à l'émission d'un polluant.* La "sensibilité" peut être précisée par un pourcentage (par exemple : les procédés qui contribuent à plus de 1% des émissions totales de polluants liées au système doivent être considérés). Ainsi, dans le cas d'une production industrielle d'un très grand nombre de produits, la fabrication des équipements et des infrastructures ne participent qu'à une infime partie des consommations et des émissions et n'affecte donc pas les résultats de l'ACV. Elle peut en être, dès lors, exclue.

- Règle n°3 : *les étapes communes aux différents scénarios peuvent être exclues à condition que les flux de référence affectés à celles-ci soient strictement identiques* (cas d'une ACV comparative). Si, par exemple, deux produits comparés subissent une étape de réchauffement techniquement identique mais que l'un a besoin de 10% de chaleur de plus que l'autre, l'étape ne pourra être exclue.

[15] JOLLIET O., SAADE M. et CRETTAZ P., *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, page 37

5.3. Inventaire des émissions et des extractions

5.3.1. Principe général

Lorsque les différentes alternatives et leur fonction commune ont été clairement identifiées et que les limites du système considéré ont été définies, l'on peut aborder la deuxième étape de l'ACV : l'inventaire des émissions et des extractions, aussi appelé inventaire des flux élémentaires ou encore inventaire de cycle de vie (ICV). Celui-ci consiste en une **quantification des flux de matières, d'énergie** qui entrent et sortent du système, donc qui traversent ses limites. Il rassemble notamment toutes les ressources consommées[16] ainsi que toutes les substances polluantes émises au cours du cycle de vie du produit ou service.

L'élaboration de l'inventaire impose le respect d'une démarche structurée. Pour chaque procédé unitaire constitutif du système modélisé par l'arbre des procédés (cfr. supra), les **flux intermédiaires** entrants et sortants (flux de matières et d'énergie) sont identifiés ; ceci constitue un **inventaire de production**, qui sera ramené à l'unité fonctionnelle via le ratio d'utilisation équivalente. Ensuite, pour chaque type de flux entrants, des données d'extraction et d'émissions **agrégées**, appelées **facteurs d'extraction ou d'émissions**, sont recueillies dans des bases de données ou directement chez les entreprises concernées. L'inventaire est dès lors calculé en multipliant l'inventaire de production par les facteurs d'extraction ou d'émissions provenant d'une ou plusieurs bases de données. Enfin, les différentes données d'extraction et d'émissions sont sommées pour obtenir un total pour chaque type d'entre elles.

Souvent, un ICV complet regroupe de très nombreuses substances (jusqu'à plusieurs centaines). Si le principe de l'inventaire est simple, la collecte des données est laborieuse et complexe. Cependant, des **bases de données** spécialisées proposent aujourd'hui des informations détaillées pour un grand nombre de procédés et de matières.

L'utilisation de données génériques agrégées est inévitable. En effet, il est impossible de remonter l'entièreté de la filière de production pour chaque élément de l'inventaire de production. Ainsi, prenons l'exemple développé plus loin du carton d'emballage secondaire : ce carton est composé principalement de papier et de colle. La colle est elle-même produite à partir de nombreux éléments, notamment de la soude caustique. Les données d'inventaire relatives à la fabrication de soude caustique seront issues d'une base de données et donc agrégées : on ne tentera pas de récolter l'information chez les entreprises depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la production car cela représente un travail considérable voire quasi infini s'il devait être effectué pour chaque intrant.

Il est à noter que les données relatives à la consommation d'électricité (vecteur d'énergie secondaire) et donc à sa production présentent une particularité. En effet, la production d'électricité est réalisée à

[16] Dans la littérature, on parle également de ressources *extraites*.

partir de sources d'énergie renouvelables (biomasse, éolien, solaire, etc.) et non renouvelables (pétrole, gaz naturel, charbon, énergie nucléaire, etc.). Or, en fonction du type de source, l'impact environnemental imputé à la production d'électricité, notamment en termes d'émissions dans l'air, peut être fondamentalement différent. Pour chaque pays ou région, on peut donc établir un **profil énergétique** représentatif de l'utilisation réelle des sources d'énergie. L'on veillera donc à prendre en compte un profil énergétique adéquat dans l'ACV, puisque la manière dont est produite l'électricité consommée dans les différents processus unitaires peut affecter considérablement les résultats de l'inventaire.

5.3.2. Base de données d'inventaire de cycle de vie

Il existe de nombreuses bases de données d'ICV à travers le monde, l'Europe étant historiquement le continent plus actif dans ce domaine. Ainsi, plusieurs pays ont développés des bases de données nationales, comme la Suède, l'Allemagne ou la Suisse. L'Union Européenne possède également sa propre banque de données, nommée *ELCD*. Hors Europe, les Etats-Unis, le Canada, la Corée et le Japon ont développé des bases de données substantielles.

Il existe également des bases de données élaborées par des universités ou des sociétés de consultance, certaines concernant des secteurs industriels particuliers. Ainsi, l'association PlasticsEurope (anciennement APME – Association for Plastics Manufacturing in Europe) publie des ACV qu'elle met périodiquement à jour et dispose d'une banque de données concernant les principales familles de plastiques. Citons également la FEFCO – Fédération Européenne des Fabricants de Carton Ondulé – qui a publié en 2003, 2006 et 2009 un rapport contenant des données agrégées d'inventaire pour la production de carton ondulé en Europe, intitulé *European Databasse for Corrugated Board: Life Cycle Studies*[17]. Citons enfin la base de données danoise EDIP ou encore la néerlandaise IVAM LCA Data, qui se caractérisent toutes deux par un nombre important de procédés (plus de cent pour la première et plus de mille pour la seconde).

Selon A. CURRAN et P. NOTTEN (2006)[18], ces différentes bases se caractérisent par des données diverses et fragmentées et par un faible niveau d'harmonisation, conséquence du nombre important de pays et d'acteurs (industries, recherche, autorités publiques) travaillant indépendamment.

En Europe, la base de données **Ecoinvent** est probablement la plus reconnue et la plus complète. Elle est le fruit de la collaboration entre plusieurs institutions fédérales et instituts de recherche, rassemblés autour du projet *Ecoinvent 2000*, ayant pour but de combiner différentes banques de données existantes et de les enrichir. Le résultat est un « *ensemble unifié et générique de données d'inventaire*

[17] *European Databasse for Corrugated Board: Life Cycle Studies*, Bruxelles, FEFCO, 2009, 38 p.
[18] CURRAN M. A. et NOTTEN P., *Summary of Global Life Cycle Inventory Data Resources*, Task Force 1: Database Registry, SETAC/UNEP Life Cycle Initiative, 2006, 34 p.

de très grande qualité»[19]. La base de données Ecoinvent comporte près de 4000 facteurs d'inventaire. Pour chaque procédé, plus de 1200 ressources et substances sont répertoriées. Elle est valable uniquement pour la Suisse et les pays d'Europe Occidentale. Pour certains procédés, des valeurs spécifiques à un pays sont disponibles. Les flux entrants et sortants des moyens de production et des infrastructures (par exemple, les machines et les bâtiments) sont parfois repris séparément. On peut donc compiler des résultats d'inventaire en tenant compte ou non des infrastructures. L'électricité est basée sur un profil énergétique moyen européen, mais des données d'inventaire pour la production d'électricité considérée seule sont disponibles pour les profils nationaux spécifiques. Par ailleurs, certains flux élémentaires comme les émissions d'azote (N_2), d'oxygène (O_2), ou encore les bruits et vibrations sont négligés.

La qualité des données n'est pas identique pour tous les procédés et substances. Dès lors, Ecoinvent propose diverses informations sous forme de métadonnées relatives aux facteurs d'extraction et d'émissions et qui renseignent sur :

- la validité géographique et temporelle des données ;
- la forme des données : agrégées, moyennée ou sous forme d'un ordre de grandeur ;
- les limites du système : « craddle to grave » ou « craddle to gate » ;
- les éventuelles lacunes des données ;
- l'origine des données : littérature ou site de production.

Au vu de ses qualités, la base de données Ecoinvent sera effectivement utilisée dans le cadre de ce mémoire.

5.3.3. Coproduits et problème d'affectation

Nombre de procédés de production industrielle ou agricole et de traitement de déchet sont des systèmes à plusieurs fonctions, c'est-à-dire qu'ils génèrent des produits multiples. Cependant, dans une ACV, on ne considère habituellement qu'un seul de ces produits.

Un exemple simpliste est celui de la production du blé panifiable. Celle-ci engendre **simultanément** la production des grains de blé et de paille. Le grain sert à fabriquer le pain et la paille peut être utilisée pour la litière des animaux et a donc une certaine valeur (sinon elle serait un déchet – cfr. infra). Or, si l'on effectue l'analyse de cycle de vie du grain de blé, un problème d'attribution des émissions respectives à chaque élément va logiquement se poser.

Sachant que dans la réalisation d'une ACV, on étudie des produits ou services remplissant une fonction, et que la paille ne remplit pas la même fonction que le grain, il sera nécessaire d'**affecter** (terme utilisé dans la norme ISO 14040), de répartir, les différents impacts environnementaux et les

[19] JOLLIET O., SAADE M. et CRETTAZ P., *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, page 54

extractions de matières premières entre le produit étudié et les **coproduits**. Ainsi, *« à chaque fois qu'un système remplit plusieurs fonctions, il pose des problèmes d'affectation »*[20].

Le problème de l'affectation s'appréhende en termes de valeur économique. Sur base de celle-ci, on distingue trois types de « produits » induisant trois types de cofonctions simultanées :

- les **coproduits** : en plus d'un produit principal, un procédé de production peut générer des produits secondaires ayant une valeur économique, mais qui ne correspondent pas à la fonction considérée. Le cas du blé développé ci-dessus est un exemple typique de coproduit. La figure 4 représente schématiquement le problème :

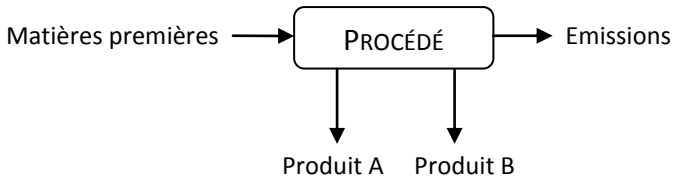


Figure 4. Problème d'affectation : coproduits

- les **déchets** : l'article 3 de la *directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives* définit un déchet comme étant *« toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire »*[21]. Dans l'approche économique utilisée pour résoudre les problèmes d'allocation, les déchets sont plutôt considérés comme des produits n'ayant **aucune valeur marchande**, voire même présentant une valeur négative (donc un coût), et qui exigent un traitement. Notons que la même directive 2008/98/CE définit la notion de traitement comme étant *« toute opération de valorisation ou d'élimination, y compris la préparation qui précède la valorisation ou l'élimination »*[22]. La valorisation d'un déchet, qui peut notamment consister en un recyclage, redonne une valeur économique au déchet, qui dans le cas du recyclage redevient un produit (cfr. infra). Le présent cas des déchets concerne plutôt l'élimination.

  Toujours est-il que le traitement des déchets génère des émissions et consomme des matières premières et de l'énergie. Or, généralement, les installations de traitement traitent conjointement plusieurs flux de déchets. On parle alors de **cotraitement**. Les exemples les plus représentatifs sont ceux de l'incinération (sans valorisation énergétique) et de la mise en décharge. On est de fait à nouveau confronté à un problème d'affectation. Il est donc nécessaire, lorsqu'on s'intéresse à un déchet spécifique et à son traitement, d'imputer à celui-ci les émissions et les extractions dont il est « responsable ».

[20] DEGREZ M., *Industrie, énergie et environnement*, Bruxelles, ULB, syllabus, 2007
[21] Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives, article 3, alinéa 1
[22] Op. Cit., article 3, alinéa 14

La figure 5 représente schématiquement le problème d'affectation engendré par le cotraitement :

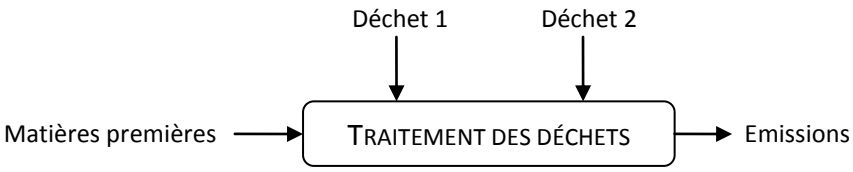


Figure 5. Problème d'affectation : cotraitement

- les **déchets recyclés** : comme explicité ci-dessus, la valorisation d'un déchet (produit sans valeur ou à valeur négative) permet de redonner à celui-ci une valeur économique positive grâce à un traitement, par exemple le recyclage. La valorisation énergétique des déchets lors de l'incinération ou le réemploi sont également des exemples de **revalorisation**. On parle alors de recyclage en **boucle fermée** lorsqu'une réutilisation des produits recyclés est possible à l'intérieur du système considéré. La prise en compte de la réduction de consommation de matières premières et des émissions ainsi évitées est dès lors aisée. Les boucles fermées s'apparente donc à des cofonctions simultanées. La figure 6 représente schématiquement l'abstraction :

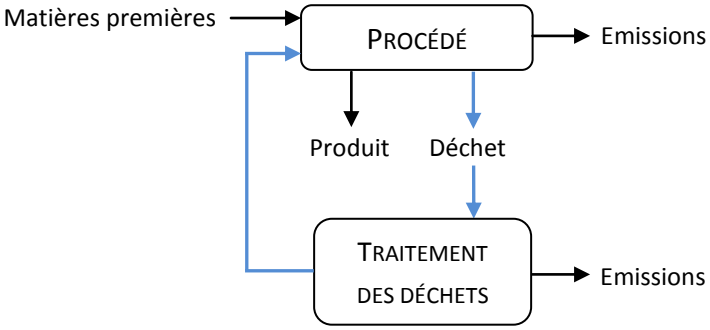


Figure 6. Recyclage en boucle fermée

On parle de recyclage en **boucle ouverte** lorsque la réutilisation du produit recyclé se fait à l'extérieur du système analysé. Les boucles ouvertes s'apparente quant à elles à des **cofonctions successives**. La figure 7 représente schématiquement l'abstraction :

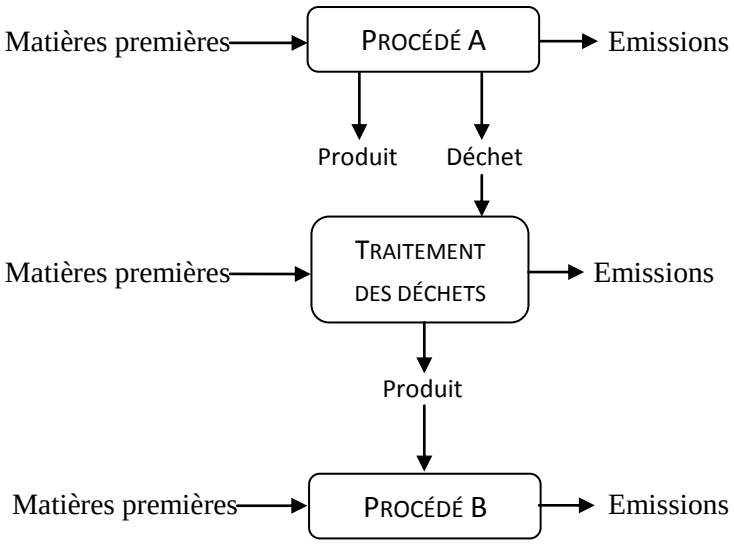


Figure 7. Recyclage en boucle ouverte

5.3.4. Résolution des problèmes d'affectation

La résolution des problèmes d'affectation n'est pas chose facile. Toutefois, la méthode utilisée peut avoir une influence non négligeable sur les résultats de l'ACV. Issue d'un consensus entre la SETAC et l'ISO, une hiérarchie de méthode a été définie.

Lorsqu'on est confronté à un système comprenant des cofonctions simultanées, on tentera en premier lieu d'**éviter l'allocation**. Cela peut se faire soit par subdivision des procédés, soit par extension du système. Pour la **subdivision des procédés**, il convient d'examiner en détail le système étudié et de déterminer si un ou plusieurs coproduits sont spécifiques à un sous-procédé ; elle s'applique donc lorsqu'on peut associer indépendamment un coproduit à un sous-procédé.

La méthode **d'extension du système** repose sur un principe de substitution. L'appliquer consiste à considérer *« qu'un système qui assure plusieurs fonctions en même temps évite l'existence d'autres systèmes remplissant séparément chacune des fonctions »*[23]. La figure 6 ci-dessous représente schématiquement un procédé 1 qui réalise la production du produit A et du coproduit B, et un procédé 2, qui génère un produit B' similaire à B. En appliquant la méthode, le système s'étend à la production de B' que B substitue. Les émissions et extractions liées au produit substitué B' peuvent alors être soustraites à celles du procédé 1, et donc de déduire lesquelles sont effectivement imputable au produit A. La figure 8 schématise la méthode d'extension du système :

[23] DEGREZ M., *Industrie, énergie et environnement*, Bruxelles, ULB, syllabus, 2007

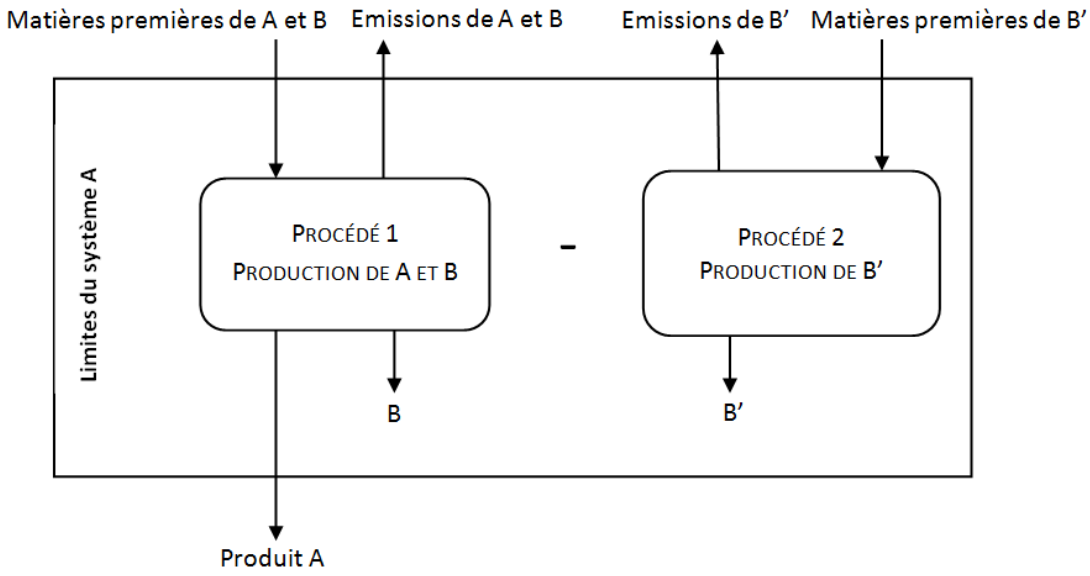


Figure 8. Extension du système
Source : JOLLIET et al. (2005)

Il est à noter que ce calcul n'est valide que si on peut prouver que la substitution a réellement lieu.

Lorsqu'il n'est pas possible d'éviter l'allocation, on peut procéder par **allocation physique**, qui consiste en l'affectation des extractions et émissions aux multiples coproduits en s'appuyant sur des relations physiques. Deux méthodes existent : la méthode des variations marginales et celle de la causalité physique**.** La méthode des **variations marginales** n'est applicable que dans le cas où l'on peut faire varier volontairement la proportion entre le produit et le coproduit. On détermine les émissions et les consommations pour une situation de référence et pour une situation où la production d'un des produits a légèrement varié par rapport à la référence. La part à affecter à chaque coproduit sera calculée grâce à la résolution d'un système de deux équations à deux inconnues.

La méthode de **causalité physique** consiste dans le choix d'un paramètre physique représentatif de la relation de causalité entre production et charges environnementales, qui seront affectées proportionnellement à ce paramètre. Ainsi, la masse, le volume, la surface, le pouvoir calorifique inférieure sont des grandeurs physiques communément utilisées dans la pratique, même si elles n'y reflètent que rarement une réalité causale. Cette méthode est donc assez discutable.

Enfin, lorsqu'on ne peut appliquer l'allocation physique, on pratiquera l'**allocation financière**, méthode qui se base sur un principe de causalité économique. Le revenu financier est alors considéré comme la principale raison de la production des (co-)produits. Il est la raison d'exister de la fonction. L'affectation des impacts environnementaux se fait donc sur base de la valeur économique respective des différents outputs. Ainsi, par exemple, dans la production de viande bovine, certains restes impropres à la consommation pour l'homme sont utilisés pour la fabrication de nourriture pour chien. Or, il est raisonnable de penser que le principal raison d'exister de la production de la viande bovine est l'alimentation humaine. On pourrait donc imaginer que, financièrement parlant, 85% de la valeur

reviennent à la viande et 15% à la nourriture canine. Les charges environnementales seraient dès lors réparties proportionnellement à ces pourcentages.

En résumé, la hiérarchie des méthodes de résolution des problèmes d'affection est la suivante :

1. Evitement de l'allocation par subdivision des procédés ou par extension du système ;
2. Allocation physique par la méthode des variations marginales ou par la méthode de causalité physique ;
3. Allocation financière.

5.4. Analyse de l'impact environnemental

5.4.1. Principe général et premières difficultés

L'étape d'inventaire a permis de donner une valeur chiffrée aux quantités de matières et d'énergie consommées (flux élémentaires entrants) et aux émissions dans l'air, l'eau et le sol (flux élémentaires sortants). Troisième phase de l'analyse de cycle de vie, l'analyse de l'impact environnemental a pour but de relier les données d'inventaire à leur impact sur le milieu naturel (incluant l'homme et sa santé).

Lors de l'ICV, une première agrégation a été réalisée en additionnant toutes les extractions et émissions de la même substance. On obtient donc des totaux par substance qui sont rassemblés dans un tableau d'inventaire. Le nombre d'éléments est souvent très important (plusieurs centaines). Lors d'une ACV comparative, une alternative est souvent préférable à une autre pour certaines substances mais pas pour d'autres. De plus, l'ordre de grandeur de la différence entre chaque substance peut être plus ou moins significatif en termes de dommages environnementaux. L'utilisation de méthodes permettant l'agrégation des émissions en fonction de leurs potentiels d'impact est donc primordiale. De plus, tenter de comparer les différents scénarios sur base des seuls résultats de l'ICV semble plus que fastidieux, à moins de ne retenir que quelques substances pour la comparaison.

Deux difficultés se présentent donc lors de l'analyse de l'impact environnemental : le problème de l'agrégation et celui de la comparaison. En effet, il n'est pas aisé de comparer des émissions de mercure dans l'eau à des émissions de méthane dans l'air. Pour reprendre un exemple enfantin, cela revient à comparer des pommes et des poires, ce qui ne veut pas dire que la comparaison est impossible. Il suffit de trouver le bon critère de comparaison : masse, durée de vie, valeur nutritive, etc. Dans le cas d'une ACV, les substances seront confrontées sur base de leur capacité à endommager l'environnement. Le problème de l'agrégation illustre la difficulté de regrouper certaines substances au sein d'une même classe d'impact et de trouver un moyen d'exprimer cet impact par une seule valeur générale, résumant les valeurs de chaque substance. Pour dépasser ces obstacles, plusieurs méthodes existent (cfr. infra), mais toutes respectent une méthodologie de base (cfr. infra).

5.4.2. Cadre méthodologique de base

Premièrement, il convient de rassembler les résultats de l'ICV ayant des effets identiques ou similaires dans des catégories intermédiaires d'impact. Par exemple, on peut regrouper toutes les émissions qui ont une incidence sur la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre et qui sont donc de potentiels vecteurs de changement climatique. Ainsi, le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), l'hémioxyde d'azote (N_2O), le trichlorofluorométhane ($CFCl_3$) et de nombreux autres gaz appartiennent à cette catégorie de substances, appelée **catégorie intermédiaire**. Cette première étape est appelée **classification**. Elle consiste donc en la définition d'une série de catégories d'impacts dites intermédiaires dans lesquelles on classe les différentes les extractions et émissions. Il est à noter qu'une émission peut se retrouver dans plusieurs catégories, si les impacts qu'elle engendre sont multiples. En tant que catégories intermédiaires, on peut citer le changement climatique, l'acidification terrestre, l'eutrophisation aquatique, la toxicité pour l'homme, etc. Différentes listes existent et leur composition varie en fonction des méthodes.

La deuxième étape de la méthodologie est la **caractérisation intermédiaire**, qui consiste en la pondération[24] de chaque substance au sein de sa (ses) catégorie(s) respective(s), c'est-à-dire l'expression de cette substance en fonction d'une **substance de référence**. Pour cela, on utilise des **facteurs de caractérisation intermédiaires**, qui déterminent donc le poids relatif d'une substance émise ou extraite dans le cadre d'une catégorie d'impact spécifique. Les masses des substances sont ainsi multipliées par ces facteurs puis sommées pour obtenir un **score d'impact intermédiaire** qui, mathématiquement, peut s'exprimer comme suit :

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \cdot M_s$$

avec SI_i = score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie *i* ;
$Fi_{s,i}$ = facteur de caractérisation intermédiaire de la substance *s* dans la catégorie *i* ;
M_s = masse extraite ou émise de la substance *s*.

Ainsi, pour reprendre l'exemple des gaz à effet de serre utilisé supra, les émissions des différents gaz peuvent être ramenées à une émission de CO_2 équivalente (cfr. infra).

Enfin, la troisième étape est celle de la caractérisation des dommages. Elle permet d'évaluer la contribution des catégories intermédiaires à une ou plusieurs **catégories de dommages** sur une entité vulnérable (par exemple, l'équilibre climatique, la santé humaine, la qualité des écosystèmes). Pour ce faire, on multiplie les scores d'impact intermédiaires (SI_i) par un **facteur de caractérisation de dommages** qui quantifie les dommages générés par une unité de chaque substance de référence (par

[24] Il ne faut pas confondre la pondération de la catégorisation intermédiaire avec le fait de pondérer une catégorie d'impact par rapport à une autre, c'est-à-dire lui donner une plus grande importance relative sur base de valeurs éthiques, sociales ou politiques, ce qui est scientifiquement beaucoup plus discutable, voire douteux.

exemple, par unité de CO_2 équivalente). Ainsi, plusieurs catégories intermédiaires peuvent contribuer de manière plus ou moins significative à des dommages sur la qualité des écosystèmes. Les produits de la multiplication pour chaque catégorie intermédiaire sont sommés pour obtenir le **score de caractérisation des dommages** pour chaque catégorie de dommages, qui, mathématiquement, s'exprime comme suit :

$$SD_d = \sum_i FD_{i,d} \cdot SI_i$$

avec SD_d = score de caractérisation de dommages pour la catégorie de dommage *d*

$FD_{i,d}$ = facteur de caractérisation de dommage entre la catégorie intermédiaire *i* et la catégorie de dommage *d*

SI_i = score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie *i*

Le schéma suivant résume l'abstraction générale de la méthodologie d'analyse de l'impact environnemental et est purement illustratif. Les listes des catégories intermédiaires et des catégories de dommages ne sont absolument pas exhaustives, de même que les liens entre les deux niveaux de catégories. On pourrait par exemple relier la catégorie intermédiaire « changement climatique » avec la catégorie de dommages « santé humaine ».

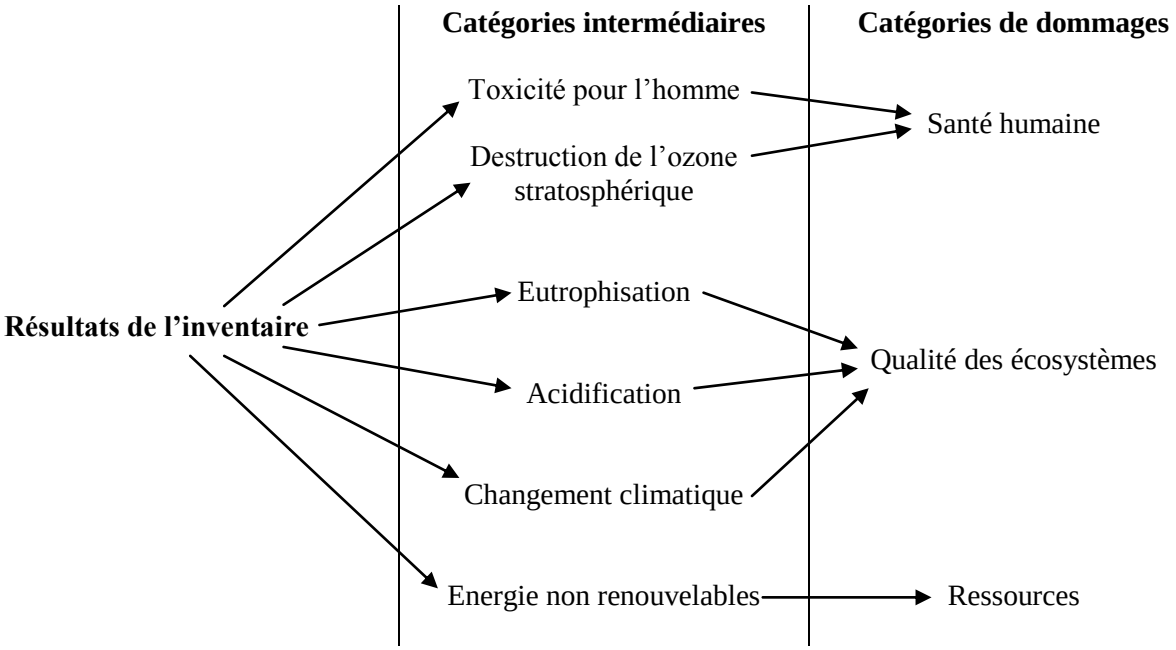


Figure 9. Méthodologie de l'analyse de l'impact environnemental

D'autres étapes facultatives sont aussi prévues dans la méthodologie de base, à savoir la normalisation, le groupement et la pondération. La pondération, qui consiste à donner une importance relative aux

scores de caractérisation intermédiaires ou de dommages sur base de la valeur accordée par la société aux différentes catégories, est très difficilement justifiable d'un point de vue scientifique, puisque basée sur un jugement de valeurs sociales et éthiques. Cela revient donc à dire, par exemple, que le changement climatique doit avoir un poids plus important dans le calcul des scores que l'eutrophisation. **Ces étapes optionnelles ne seront ni développées ni mises en pratiques dans le cadre de ce mémoire**.

5.4.3. Méthodes d'analyse de l'impact environnemental

A partir du cadre méthodologique de base, plusieurs méthodes ont été développées par différents organismes et chercheurs. Les principales d'entre elles sont le *Dutch Handbook on LCA* (Guide hollandais sur les ACV – GUINÉE, 2001), *Ecoindicateur 99* (GOEDKOOP et SPRIENSMA, 1999), *EPS 2000d* (STEEN, 1999), et *Impact 2002+* (JOLLIET *et al*., 2003). La principale différence entre ces méthodes se situe au niveau des catégories retenues à chaque palier. Ainsi, la méthode *EPS 2000d* ne reprend aucune catégorie intermédiaire mais considèrent sept catégories de dommage, là ou les autres n'en comptent que trois ou quatre, voire aucune en ce qui concerne le *Dutch Handbook*. Autre exemple, l'*Ecoindicateur 99* ne reprend pas les catégories intermédiaires de l'eutrophisation et de d'utilisation des ressources en eau. Nous ne développerons pas en détails les caractéristiques de ces méthodes.

Pour l'ACV réalisée dans le cadre du présent mémoire, nous utiliserons la méthode **Impact 2002+** car elle nous semble être la plus récente et reprend des éléments des autres méthodes et les complète par d'autres (facteur de catégorisation – cfr. infra.). Elle suit la méthodologie de base décrite supra et en est à sa troisième version (version 2.1, lancée en 2005). Elle permet une analyse de l'impact au niveau intermédiaire ainsi qu'un niveau des dommages en fournissant des facteurs de caractérisation pour plus de 1500 substances[25]. Ainsi, les résultats de l'ICV sont répartis en **quatorze catégories d'impact intermédiaires**, qui sont ensuite regroupées en **quatre catégories de dommages**, tel que représenté sur la figure 10 :

[25] JOLLIET O., MARGNI M., et CHARLES R., *Impact 2002+ : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*, International Journal of LCA, volume 8, 2003, octobre, 7 p.

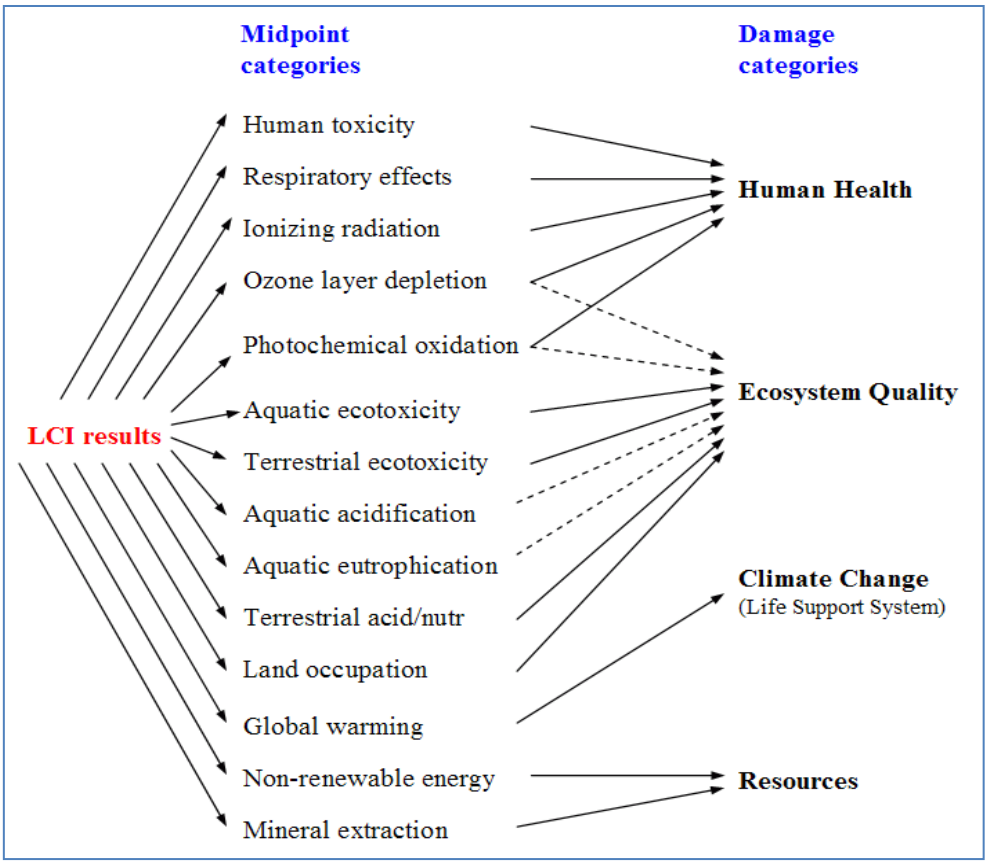


Figure 10. Schéma général de la méthode Impact 2002+
Source : JOLLIET et al. (2003)

Comme expliqué supra, les scores de caractérisation intermédiaire (catégories d'impact intermédiaires) sont calculés grâce à des **facteurs de caractérisation intermédiaires** basés sur un principe d'équivalence. Ils sont exprimés pour la plupart en kg-équivalents d'une substance de référence. Les facteurs de caractérisation sont issus de différents modèles et d'autres méthodes d'analyse de l'impact. Les facteurs relatifs à la toxicité humaine (« *Human toxicity* » sur la figure 10) ont été déterminés grâce à Impact 2000, « *un modèle multi-milieux et multi-voies d'exposition développé en Europe de l'Ouest par PENNINGTON et al. (2005)* »[26]. La construction de ce modèle ne sera pas décrite dans cet écrit. D'autres facteurs tels que la formation de photo-oxydants, la destruction de la couche d'ozone ou eutrophisation et acidification terrestre sont repris de la méthode *Ecoindicateur 99* ou du *Dutch Handbook on LCA*. Le tableau 1 ci-dessous récapitule les différentes catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002 + :

[26] JOLLIET O., SAADE M. et CRETTAZ P., *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, p. 99

Catégorie intermédiaire	Substance de référence intermédiaire
Toxicité humaine (cancérigène)	kg chlorure de vinyle éq. dans l'air
Toxicité humaine (non cancérigène)	kg chlorure de vinyle éq. dans l'air
Effets respiratoires	kg $PM_{2.5}$ éq. dans l'air
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 éq. dans l'air
Radiations ionisantes	Bq Carbone-14 éq. dans l'air
Formation de photo-oxydants	kg éthylène éq. dans l'air
Ecotoxicité aquatique	kg triéthylène glycol éq. dans l'eau
Ecotoxicité terrestre	kg triéthylène glycol éq. dans l'eau
Acidification/eutrophisation terrestre	kg SO_2 éq. dans l'air
Acidification aquatique	kg SO_2 éq. dans l'air
Eutrophisation aquatique	kg PO_4^{3-} éq. dans l'eau
Occupation des sols	m² terre éq.
Changement climatique	kg CO_2 éq. dans l'air
Extraction de minerais	MJ d'énergie supplémentaire ou kg Fe éq. (minerai)
Energie non renouvelable	MJ totaux d'énergie non renouvelable ou kg pétrole brut éq.

Tableau 1. Catégories intermédiaires et substances de référence utilisées dans Impact 2002+
Source : JOLLIET et al (2003)

Par ailleurs, en ce qui concerne la dimension temporelle, la principale caractéristique d'Impact 2002+ est d'intégrer les impacts d'une émission ou d'une extraction sur le **long terme**, ce qui n'est pas sans conséquence sur les facteurs de caractérisation.

Ainsi, pour la catégorie des changements climatiques, la méthode s'est basée sur les travaux du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), et plus particulièrement sur les potentiels de réchauffement global (PRG) permettant d'exprimer les différents gaz à effet de serre en équivalent-CO_2. Le GIEC définit l'équivalent-CO_2 comme étant « *la quantité émise de dioxyde de carbone qui provoquerait le même forçage radiatif intégré dans le temps jusqu'à une date donnée qu'une quantité émise d'un gaz à effet de serre à longue durée de vie ou qu'un mélange de gaz à effet de serre. L'émission d'équivalent-CO_2 est obtenue en multipliant l'émission d'un gaz à effet de serre par son potentiel de réchauffement global (PRG) pour la période de temps considérée* »[27].

Dans son bilan de 2001, le GIEC a établit un tableau d'équivalence-CO_2 sur trois horizons temporels : 20 ans, 100 ans et **500 ans**. C'est donc ce dernier horizon qui a été choisi dans Impact 2002+ afin de prendre en compte les impacts à long terme. Dès lors, l'équivalent-CO2 retenu par exemple pour le méthane est de 7 et non de 23 (qui est l'équivalent-CO2 sur un horizon de 100 ans). Le tableau 2 ci-dessous reprend les équivalences d'effet de serre pour les principaux gaz à effet de serre, telles qu'utilisées dans la méthode Impact 2002+ :

[27] GROUPE D'EXPERT INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, *Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse*, Genève, GIEC, 2008, p. 36

Nom de la substance	Formule	Equivalence effet de serre [kgéqCO_2/unité]
Dioxyde de carbone	CO_2	1
Monoxyde de carbone	CO	1,57
Méthane	CH_4	7
Oxyde nitreux	N_2O	156
Trichlorofluorométhane (CFC-11)	$CFCl_3$	1600
Dichlorodifluorométhane (CFC-12)	CF_2Cl_2	5200
Chlorodifluorométhane (HCFC-22)	CHF_2Cl	540
1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoroéthane (CFC-113)	$C_2F_3Cl_3$	2700
Hexafluoroéthane (CFC-116)	C_2F_6	18000
Pentafluoroéthane (HFC-125)	CHF_2CF_3	1100
1,1,1,2-tetrafluoroéthane (HFC-134a)	CH_2FCF_3	400
1-chloro-1,1-difluoroéthane (HCFC-142b)	CH_3CF_2Cl	740
1,1-dichloro-1-fluoroéthane (HCFC-141b)	CH_3CFCl_2	220
1,1,1-trifluoroéthane (HFC-143a)	CH_3CF_3	1600
1,1-difluoroéthane (HFC-152a)	CH_3CHF_2	37
Trichlorométhane (chloroforme)	$CHCl_3$	9
Dichlorométhane	CH_2Cl_2	3

Tableau 2. Potentiel de réchauffement global pour un horizon temporel de 500 ans
Source : GIEC (2001)

Enfin, la méthode Impact 2002+ répartit les impacts intermédiaires dans **quatre catégories de dommages** : la santé humaine, le changement climatique, la qualité des écosystèmes et les ressources.

La catégorie de la **santé humaine** regroupe les catégories intermédiaires de la toxicité humaine (cancérigène et non cancérigène), de la formation de photo-oxydants, des effets respiratoires, de la destruction de la couche d'ozone et des radiations ionisantes et les exprime en années équivalentes de vie perdue (DALY – *Disability Adjusted Life Years*). Pour cela, on utilise des facteurs de caractérisation de dommages (cfr. Tableau 3) qui permettent de convertir les kilogrammes de substances équivalentes en DALY (unité du score de caractérisation de dommages).

La catégorie du **changement climatique** reprend directement le résultat du niveau intermédiaire, qui peut être considéré comme un dommage sur l'équilibre climatique, système permettant la vie biologique. Il s'agit donc bien d'une catégorie de dommage à part entière, exprimé en kg CO_2-équivalent. On pourrait imaginer que le changement climatique (en tant que catégorie intermédiaire) cause des dommages sur la santé humaine ou la qualité des écosystèmes mais par manque de modélisation précise de la relation de cause à effet, Impact 2002+ ne prévoit pas de facteur de caractérisation de dommage pour ces catégories.

La catégorie de la **qualité des écosystèmes** rassemble les catégories intermédiaires de l'écotoxicité aquatique, de l'acidification aquatique, de l'eutrophisation aquatique, de l'écotoxicité terrestre et de l'eutrophisation et acidification terrestre et de l'occupation des sols. Bien que la destruction de la couche d'ozone et la formation de photo-oxydants participent très probablement aux dommages sur les écosystèmes, aucun modèle ne permet de quantifier leur contribution. Impact 2002+ ne prévoit donc

pas de facteur de caractérisation pour ces deux catégories qui, de ce fait, ne sont pas reprises dans le calcul du score de dommage. Ce dernier est exprimé en PDF·m²·an, c'est-à-dire en fraction d'espèce disparue sur un mètre carré sur un an. Il est à noter qu'il n'existe pas encore de facteur de caractérisation pour l'acidification et l'eutrophisation aquatique.

La catégorie des **ressources** regroupe les catégories intermédiaires de la consommation d'énergie primaire non renouvelables et des extractions de minerais. L'unité du score de caractérisation des dommages est le mégajoule (MJ).

Pour rappel, le score de caractérisation pour une catégorie de dommage s'obtient en sommant les produits des facteurs de caractérisation de dommage par les scores de caractérisation intermédiaires des catégories intermédiaires composant la catégorie de dommage (cfr supra).

Le tableau 3 ci-dessous décrit les facteurs de caractérisation de dommages pour chaque catégorie intermédiaire ainsi que les unités correspondant aux catégories de dommages :

Catégorie intermédiaire	Facteur de dommages	Unité de dommages	Catégorie de dommages
Toxicité humaine (cancérigène)	1,45E-6	[DALY/kg chlorure de vinyle]	Santé humaine
Toxicité humaine (non cancérigène)	1,45E-6	[DALY/kg chlorure de vinyle]	
Formation de photo-oxydants	2,13E-6	[DALY/kg ethylène]	
Effets respiratoires	7,00E-4	[DALY/kg $PM_{2,5}$]	
Destruction de la couche d'ozone	1,05E-3	[DALY/kg CFC-11]	
Radiations ionisantes	2,10E-10	[DALY/Bq Carbone-14]	
Ecotoxicité aquatique	5,02E-5	[PDF.m^2.an/kg triethylène glycol]	Qualité des écosytèmes
Ecotoxicité terrestre	7,91E-3	[PDF.m^2.an/kg triethylène glycol]	
Acidification/Eutrophisation terrestre	1,04	[PDF.m^2.an/kg SO_2]	
Acidification aquatique	/	/	
Eutrophisation aquatique	/	/	
Occupation des sols	1,09	[PDF.m^2.an/m^2 terre arable organique]	
Changement climatique	1,00	[kg CO_2/kg CO_2]	Changement climatique
Extraction de minerais	5,10E-2	[MJ/kg Fe]	Ressources
Energie non renouvelable	4,65E+1	[MJ/kg pétrole brut]	

Tableau 3. Facteurs de caractérisation et unités de dommages utilisés dans Impact 2002+
Source : JOLLIET et al. (2005)

L'utilisation d'Impact 2002+ permet au final d'agréger et de classifier un grand nombre de données d'inventaire pour en faciliter l'analyse, et ce, sans utiliser de pondération non scientifique. Les différents impacts environnementaux peuvent donc être identifiés et quantifiés plus aisément grâce à cette méthode.

5.5. Interprétation

Cette quatrième et dernière étape de l'ACV permet de **tirer des conclusions** sur les résultats obtenus, notamment à la phase d'analyse de l'impact environnemental. Elle tente de mettre en exergue les étapes du cycle de vie (extraction, transport, fabrication, utilisation, traitement des déchets, etc.) ou les composants du système ou produit qui présentent les dommages environnementaux les plus importants. Dans le cas d'une ACV comparative, on fera ressortir les différences entre les alternatives étudiées.

L'interprétation ne se basera pas uniquement sur les résultats de l'étape précédente (analyse de l'impact), mais se fera sur l'ensemble de l'analyse du cycle de vie, considérant chaque phase de l'analyse.

Cette ultime étape a également pour but de montrer les limites et les faiblesses de l'étude. Les données incomplètes ou de qualité incertaine doivent être clairement identifiées, de même que les incertitudes liées aux hypothèses. Tous ces points viendront relativiser les résultats et par conséquent les conclusions qui doivent impérativement comporter des réserves quant à leur véracité.

A partir des conclusions, il est possible d'émettre des recommandations voire de rechercher des pistes d'améliorations. Autrement dit, l'interprétation doit fournir des informations utilisables pour la prise de décision en matière d'environnement, but ultime de l'ACV.

Enfin, on évitera d'extrapoler les conclusions hors du cadre de l'étude. Celles-ci, si elles sont vraies dans un système, ne le sont pas forcément dans un autre.

6. ANALYSE DE CYCLE DE VIE COMPARATIVE

Dans ce chapitre, nous tenterons d'appliquer au mieux la théorie développée supra afin de comparer les deux couples de purée et de leurs emballages respectifs. Les quatre étapes d'une ACV seront évidemment respectées. La phase d'inventaire sera réalisée en parallèle pour les deux alternatives afin de mettre en évidence les éventuelles différences, procédé par procédé. Les inévitables zones d'ombres quant aux données seront, dans la mesure du possible, levées par des hypothèses. Si des inconnues persistent, elles seront prises en compte dans l'interprétation des résultats et les conclusions qui en découlent.

6.1. Définitions des objectifs et du champ de l'étude

6.1.1. Objectifs de l'étude

Pour rappel, l'objectif d'une ACV doit détailler l'application envisagée, les raisons de l'étude, et le public concerné (cfr. 5.2. Définitions des objectifs et du champ de l'étude).

La présente analyse est donc une ACV **comparative** de deux couples de purée de pommes de terre et de leurs emballages. On étudiera donc **deux alternatives** (ou scénarios) : une purée fraîche et son emballage et une purée surgelée et son emballage (cfr. 3. Description des couples produit et emballage) afin de déterminer le plus précisément possible quel couple minimise l'impact environnemental total sur l'ensemble de son cycle de vie.

Les **raisons** de l'étude sont de deux ordres : premièrement académiques, l'ACV étant réalisée dans le cadre du mémoire de fin d'étude du Master 60 en sciences et gestion de l'environnement ; deuxièmement, informatives, la société Delhaize étant désireuse d'avoir une meilleure connaissance des impacts de ses produits sur l'environnement.

Dès lors, le **public concerné**, c'est-à-dire les personnes à qui s'adressent les résultats de l'étude, seront les responsables de chez Delhaize en charge des produits analysés (« acheteurs », « Product Manager », « Business Unit Manager », etc.) ainsi que les responsables des questions environnementales et tout autre personne intéressée de près ou de loin par la portée de l'ACV. Du coté universitaire, seront concernés le directeur et les différents assesseurs du présent mémoire ainsi que tout autre personne, étudiant, enseignant ou chercheur, désirant consulter cet écrit, notamment par l'intermédiaire des bibliothèques.

6.1.2. Champ de l'étude

Rappelons que le champ de l'étude doit, selon la norme ISO, préciser la fonction du produit ou service étudié, l'unité fonctionnelle, le système et ses frontières, les hypothèses ainsi que les limitations.

Premièrement, la **fonction principale** des couples purée-emballage est l'**accompagnement en purée de pommes de terre d'un repas quelconque**. Cette fonction est bien commune aux deux couples et sera donc la base de la comparaison. Nous ne tenterons pas d'identifier des fonctions secondaires car elles ne nous seront d'aucune utilité dans la suite de l'étude.

A partir de la fonction, l'on peut déduire l'**unité fonctionnelle** (UF). On choisira une UF d'une **portion de purée pour deux personnes**, c'est-à-dire l'accompagnement en purée de pommes de terre d'un repas pour deux personnes. On peut dès lors directement calculer le flux de référence (ratio d'utilisation équivalente) pour les deux scénarios : considérant qu'une portion de purée pour une personne équivaut à 225 grammes, soit 450 grammes pour deux personnes (ration utilisée par Delhaize), le tableau suivant résume fonction, unité fonctionnelle et flux de référence :

	Fonction	Unité fonctionnelle	Flux de référence
Alternative 1 : Couple purée fraîche et emballage	Accompagnement en purée de pommes de terre d'un repas quelconque	Portion de purée pour deux personnes	1 unité de vente (1couple purée fraîche et emballage)
Alternative 2 : Couple purée surgelée et emballage			$^{3}/_{5}$ d'unité de vente ($^{3}/_{5}$ du couple purée surgelée et emballage)

Tableau 4. Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence pour les deux alternatives étudiées

Deuxièmement, il convient de définir le système et ses frontières. Le **système** analysé regroupe l'ensemble des procédés d'extraction de toutes les matières premières utilisées dans la fabrication des produits intermédiaires, l'ensemble des procédés de transformation de ces derniers (mise en forme, etc.), la phase d'utilisation du produit, l'ensemble des procédés liés à la fin de vie (élimination ou recyclage) ainsi que tous les procédés de transports des différents flux intermédiaires, et ce, pour chacune des deux alternatives étudiés.

Une première modélisation peut être réalisée sous la forme d'un **arbre des procédés** sommaire et généraliste, dont le but est de donner une vision globale du système étudié et des nombreuses étapes qui composent le cycle de vie. La figure ci-dessous schématise les différents procédés unitaires (cfr. 5.2. Description des objectifs et du champ d'étude) ainsi que les flux de produits intermédiaires qui les relient. Les flux élémentaires entrants et sortants ne sont pas représentés afin de faciliter l'examen du diagramme :

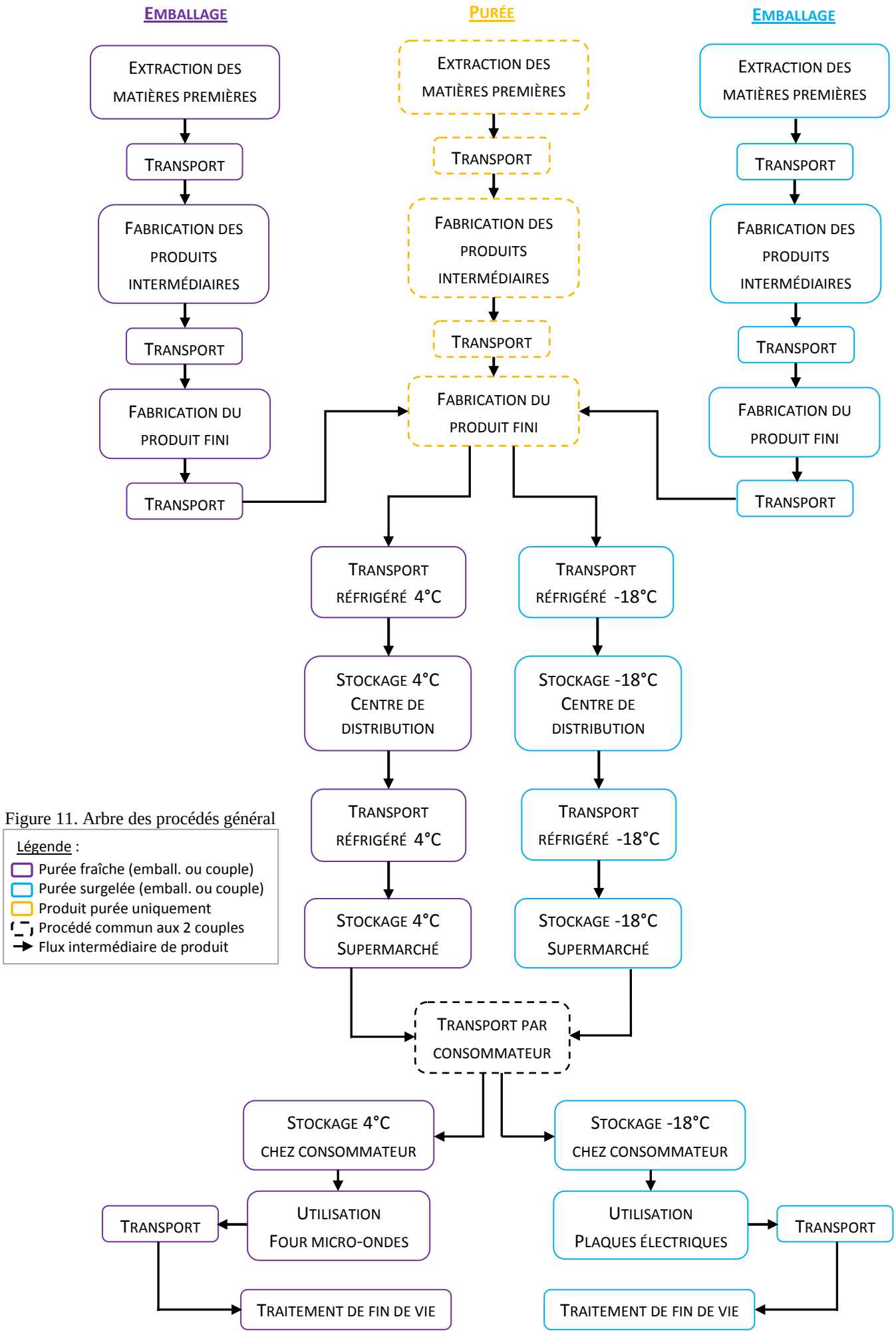


Figure 11. Arbre des procédés général

Tous les procédés modélisés sur ce diagramme seront donc pris en compte dans l'ACV, en comparant les cycles de vie des deux alternatives. On remarque immédiatement plusieurs procédés communs pour les deux scénarios. En effet, tous les procédés liés à la fabrication de la purée de pommes de terre proprement dite sont identiques pour les deux scénarios. Le procédé de transport entre le supermarché et le domicile du consommateur (« Transport par consommateur » sur l'arbre des procédés) est également identique quel que soit l'alternative considérée.

Par ailleurs, **trois hypothèses** peuvent déjà être posées :

- La **composition** de la purée ainsi que tous les procédés nécessaires à sa **production** sont considérés comme identiques pour les deux alternatives. La **fabrication** du **produit** (dans le couple produit et emballage) sera donc **exclue** de l'analyse. Par contre, les autres opérations concernant la purée (et a fortiori le couple), comme par exemple la phase d'utilisation qui dépend directement du type de conditionnement, seront bien incluses dans l'ACV.
- L'analyse de la partie « emballage » du couple ne comprendra que les emballages primaires et secondaires. L'emballage **tertiaire** et tous les procédés de son cycle de vie, depuis l'extraction jusque la fin de vie, **ne sera pas retenu** dans la présente ACV. Ce choix est basé sur le fait que l'emballage tertiaire, dont la palette est le composant principal, reste identique pour une majorité d'applications et qui plus est, est réutilisable de (très) nombreuses fois.
- N'ayant pu obtenir suffisamment d'informations concernant les **encres** utilisées sur les emballages, tant quant à la composition de celles-ci qu'aux quantités utilisées, elles ne seront pas considérée dans l'analyse de cycle de vie

D'autres hypothèses viendront s'ajouter aux deux premières dans la suite de l'étude. Elles seront précisées aux étapes concernées.

Enfin, cette analyse de cycle de vie sera réalisée dans les **limites de disponibilité** de l'information. Certaines zones d'ombre seront levées par des hypothèses, celles qui ne pourront l'être ne seront pas considérées dans l'inventaire. De plus, partant du principe qu'une information ou une donnée incertaine quant à son exactitude pourrait compromettre la véracité des résultats d'ICV ainsi que les conclusions qui en découlent, l'on préférera exclure de l'analyse les substances ou procédés entachés d'une trop grande incertitude. Les éventuelles exclusions seront évidemment prises en compte dans l'interprétation des résultats.

6.2. Inventaire des émissions et des extractions

Pour rappel, la démarche d'inventaire consiste en la quantification de tous les flux élémentaires (émissions et extractions) échangés avec l'environnement, donc traversant les frontières du système. Pour ce faire, on établit un inventaire de production, qui reprend tous les flux intermédiaires entrants et sortants. Pour chaque substance ou consommation d'énergie identifiée, on multiplie la quantité par unité fonctionnelle (en kg, kWh, etc.) par un facteur d'émissions et d'extractions issu de la base de données, en l'occurrence Ecoinvent, pour finalement obtenir un inventaire des émissions et des extractions. Cette opération sera effectuée pour chaque procédé du cycle de vie des deux alternatives analysées, excepté les étapes communes ou exclues (cfr. supra).

6.2.1. La fabrication de l'emballage primaire

6.2.1.1. Alternative 1 : purée fraîche

L'emballage primaire de la purée fraîche se compose d'une barquette, d'un film et d'un étui en carton (suremballage). Ces différents éléments seront analysés séparément.

La barquette

La barquette est constituée de polypropylène pur ; aucune autre matière n'entre dans sa composition. Le polypropylène est un polymère thermoplastique, obtenu par polymérisation du propylène (monomère) réalisée en présence d'un catalyseur de type Ziegler-Natta ou métallocène.

La mise en forme de la barquette est réalisée par la technique d'extrusion suivie immédiatement d'un thermoformage. L'extrusion consiste à alimenter en résine thermoplastique un fourreau thermo-régulé à l'intérieur duquel tourne une vis sans fin. Cette vis malaxe et transporte la matière vers une filière d'extrusion permettant d'obtenir un mélange homogène par l'effet de la chaleur et du cisaillement. La résine doit impérativement se trouver sous la forme de poudre ou de granulés pour être extrudée. La figure ci-dessous illustre le procédé :

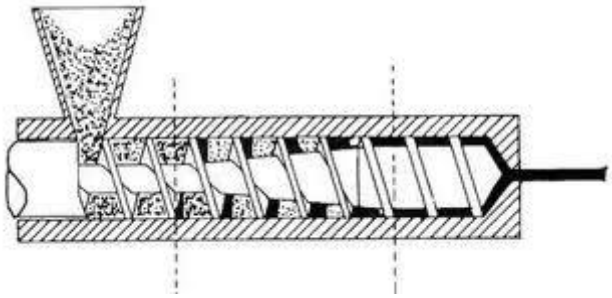


Figure 12. Schéma d'une extrudeuse
Source : site internet d'Extrusion-Réactive[28]

[28] *Description d'une opération d'extrusion*, site internet d'Extrusion-Réactive, adresse URL : http://www.extrusion-reactive.com/extrusion1.html

Le thermoformage consiste quant à lui en l'amollissement du thermoplastique par chauffage suivi d'un moulage grâce à un moule prévu à cet effet. Le polymère prend alors la forme désirée.

L'étape de mise en forme est réalisée au Danemark dans une entreprise spécialisée. Selon les informations transmises par celle-ci, le procédé d'extrusion-thermoformage ne présente que deux entrées de flux intermédiaires : le polypropylène et l'électricité. L'opération génère **1% de déchets plastiques réintroduits** dans le procédé sans traitement (recyclage en boucle fermée) et **0,5% de déchets** destinés à **l'incinération**. Une barquette pèse exactement **17,4 grammes**.

A partir de ces données, nous pouvons déduire la quantité réelle de polypropylène qui entre dans le procédé, soit 17,66 grammes (= 17,4 ÷ 0,985), la quantité effectivement consommée compte tenu du pourcent recyclé en boule fermée, soit 17,49 grammes, ainsi que la quantité de déchets à incinérer, soit 0,09 grammes. Tous ces chiffres sont ceux d'**une unité fonctionnelle,** le flux de référence étant de 1 pour le couple purée fraîche et emballage.

Le nombre d'intrants intermédiaires étant faible, l'inventaire de production s'en trouve assez réduit et ne compte de ce fait que l'entrée en résine thermoplastique. En effet, la base de données Ecoinvent nous renseigne sur la consommation d'électricité et sur les émissions et extractions générée par la production de celle-ci, intégrant le tout dans un facteur d'émissions et d'extraction pour l'extrusion et le thermoformage respectivement.

Pour établir l'inventaire des émissions, il nous reste à multiplier les données de masse de l'intrant (polypropylène) par les facteurs d'émissions et d'extraction des deux procédés de mise en forme et du polypropylène proprement dit, c'est-à-dire correspondant à la production de celui-ci depuis l'acquisition des matières premières jusqu'à l'étape de polymérisation. L'élimination des déchets de procédé sera également prise en compte à ce niveau de l'ACV, la base de données disposant d'un facteur d'émissions pour l'incinération du polypropylène (sans valorisation énergétique).

Pour des raisons de clarté et de concision, tous les résultats d'inventaire ne pourront être repris, tant ils sont nombreux (1275 substances répertoriées). Le tableau suivant regroupe quelques unes des substances émises, réparties en fonction du milieu récepteur, ramenées à une unité fonctionnelle et exprimées en kilogrammes :

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]	
CO_2	0,0537
CH_4	2,20E-04
$PM_{2,5}$	8,05E-06
CO	1,21E-04
COVNM	7,08E-05
NO_x	9,72E-05
HCl	2,18E-06
Pb	7,56E-09
SO_2	1,30E-04
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]	
Fe	3,31E-07
Pb	1,22E-10
Cl^-	1,71E-06
Zn	6,05E-09
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]	
NH_4^+	1,64E-07
DBO_5	2,88E-05
DCO	7,44E-05
Hg	4,76E-09
Phosphates	5,01E-05
Sulfates	1,26E-03
Nitrates	1,87E-05
COT	2,73E-05
Ni^{2+}	1,43E-06

Tableau 5. Inventaire des émissions par UF de la barquette (purée fraîche)

Nous remarquons quelques 53,7 grammes de dioxyde de carbone (CO_2) émis dans l'air par UF pour la production de la barquette depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa mise en forme. Les émissions de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de soufre (SO_2) et de composés organique volatils non méthanique (COVNM) montrent une valeur de l'ordre du décigramme. En ce qui concerne le sol, les émissions de plomb et de zinc relèvent du microgramme voire moins, ce qui n'enlèvent rien à leur caractère toxique pour l'environnement. Enfin, en ce qui concerne l'eau, la valeur des sulfates est la plus élevée, tandis que la DCO (demande chimique en oxygène) est plus de

deux fois supérieure à la DBO (demande biologique en oxygène). Les résultats seront étudiés de manière plus précise dans l'analyse de l'impact environnemental (cfr. 6.3. Analyse de l'impact environnemental).

En ce qui concerne la qualité des données, les trois facteurs d'émissions sont valables pour l'Europe occidentale et sont issus de la version 2010 de la base de données Ecoinvent. La production d'électricité est donc basée sur le **profil énergétique européen**. Le facteur du polypropylène regroupe les données agrégées de tous les procédés de production depuis l'extraction des matières premières jusqu'au produit fini, y compris le transport. Aucune incertitude n'est à signaler.

Le film

Le film qui vient fermer la barquette est composé d'un mélange de polyéthylène et de polyamide, tous deux thermoplastiques. La mise en forme est réalisée par un procédé de **calandrage** qui consiste en un laminage de la résine polymérique entre deux cylindres chauffants pour donner une feuille homogène de matière. Aucune d'information n'a pu être obtenue quant aux proportions exactes de chaque composant et au type de polyamide utilisé. Nous posons donc l'**hypothèse d'une composition 50% polyéthylène et 50% polyamide** (en poids). Sachant que le film, comme la barquette, est adaptée pour l'utilisation au four à micro-ondes, nous posons également l'hypothèse d'un polyamide de type **nylon 6-6**, ce dernier étant particulièrement résistant aux températures élevées ainsi qu'aux graisses. Nous posons enfin l'hypothèse d'un polyéthylène de type **LDPE** (*Low Density Polyethylene* – polyéthylène basse densité), qui est un matériau couramment utilisé pour la fabrication de films plastiques destinés au contact alimentaire.

En considérant ces hypothèses, nous pouvons calculer l'inventaire des émissions et des extractions grâce aux facteurs d'émissions fournis par la base de données Ecoinvent. Trois catégories de facteurs sont nécessaires à nos calculs : la production du polyéthylène, production du nylon 6-6 et le procédé de calandrage. Sachant que le film possède une masse de **1,3 gramme**, soit 0,65 grammes de PE et autant de nylon 6-6 suivant notre hypothèse, les facteurs d'émissions seront multipliés aux masses respectives de chaque composant, excepté pour le calandrage qui concerne la totalité du mélange.

Au vu des très faibles valeurs obtenues pour cet inventaire des émissions et extractions (la grande majorité étant inférieure au microgramme) et pour des raisons de concision, les résultats d'ICV du film plastique ne seront pas détaillés. Ils seront par contre pris en compte dans la somme des émissions et extractions lors de l'inventaire de cycle de vie total de l'alternative « purée fraîche ».

Concernant la qualité des données, les facteurs d'émissions pour la production du nylon 6-6 et du LDPE incluent tous les procédés depuis l'extraction des matières première. Quant au calandrage, toutes les consommations d'énergie et de matériaux (hors polymères) sont prises en compte. Les données sont issues de la version 2010 d'Ecovinvent et la production de l'électricité consommée est basée sur le profil énergétique européen.

L'étui en carton

L'étui qui vient envelopper la barquette et le film est composé de carton plat. Celui-ci est en fait constitué de plusieurs couches de composition différente, assemblées par compression grâce à une technique de calandrage. Il existe plusieurs catégories de carton plat : le SBB (« *Solid Bleach Board* »), le SUB (« *Solid Unbleached Board* »), le FBB (« Folding Boardbox ») et le WLC (« White Lined Chipboard ») ; nous ne détaillerons pas les différences entre chacun d'entre eux. Le carton utilisé pour le suremballage de la purée fraîche est de type **WLC**, dont la structure se compose de plusieurs couches centrales en pâte de **fibres recyclées**, enfermées entre deux couches de pâte dite chimique. Sur le recto du carton (partie visible – face d'impression) est ajoutée une couche de pâte chimique blanchie sur laquelle sont apposées deux couches d'enduit et les encres d'impression.

La catégorie de carton plat doit être connue pour le choix du facteur d'émissions adéquat dans la base de données. Nous pouvons dès lors réaliser un inventaire en sachant que, comme pour le carton ondulé (cfr. 6.2.3. Emballage secondaire : boite en carton), deux procédés sont à considérer : la **fabrication** du carton WLC, c'est-à-dire de la matière, ainsi que sa **mise en forme**, comprenant découpe, pliage et collage des extrémités pour former l'étui proprement dit. Sachant que ce dernier possède une masse de **20,95 grammes** et que le flux de référence pour le couple purée fraîche et emballage est de 1, il nous reste à multiplier la valeur de la masse par les facteurs d'émissions et d'extraction respectifs des deux procédés : fabrication et mise en forme. Bien que les encres d'impression ne soient pas considérées dans la présente ACV, il est à noter que le facteur d'émissions de la mise en forme reprend une moyenne générique concernant la quantité d'encre par unité de surface ainsi que la composition de celle-ci, qui est donc indirectement prise en compte dans l'analyse. Ceci est indépendant de notre volonté et bien que cela puisse apporter plus de précisions aux résultats, nous ne pouvons cependant garantir la fiabilité des données concernant les encres.

Pour des raisons de concision, nous ne détaillerons les résultats chiffrés d'ICV de l'étui de suremballage. Néanmoins, ceux-ci seront évidemment pris en compte dans le calcul d'inventaire final de l'alternative « purée fraîche ».

En ce qui concerne la qualité des données, le facteur d'émissions de la fabrication de carton WLC intègre toutes les étapes de production depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la sortie d'usine ainsi que le traitement interne des eaux usées. La production de l'électricité consommée se base sur le profil énergétique européen. Concernant le procédé de mise en forme, toutes les étapes ainsi que les matières et l'énergie sont comprises dans les données. Cependant, le facteur d'émission de ce dernier est basé sur le **modèle suisse** et considère donc le profil énergétique national, ce qui oblige à relativiser les résultats, les émissions et extractions liées à l'énergie différant de la moyenne européenne. Malgré cela, nous avons choisi de ne pas exclure ce procédé de l'ICV, estimant qu'il ne devrait pas modifier fondamentalement les résultats, la seule part de la mise en forme de l'étui ne représentant qu'une faible proportion dans le total de l'inventaire.

6.2.1.2. Alternative 2 : la purée surgelée

L'emballage primaire de la purée surgelée se présente sous la forme d'une poche transparente en polyéthylène de 45 micromètres (µm) d'épaisseur. A nouveau, il convient de connaître la composition exacte et le procédé de mise en forme de cet emballage.

Le polyéthylène utilisé est de type LDPE (polyéthylène basse densité), auquel est ajouté du dioxyde de titane (TiO_2), servant dans ce cas précis de pigment de coloration blanche pour le polymère, et représentant 7% de la masse de la poche. Sachant que celle-ci est de 5 grammes, nous pouvons déduire les masses respectives des deux composants, à savoir **4,65 grammes** pour le **LDPE** et **0,35 gramm**e pour le **TiO_2**.

La mise en forme est réalisée par un procédé d'extrusion-soufflage, qui comme le nom l'indique, comprend une extrusion (cfr. supra) immédiatement suivi d'un soufflage. Lors de ce dernier, le polymère extrudé en forme tubulaire est placé encore chaud au centre d'un moule dont les parois sont refroidies. De l'air est alors insufflé dans le tube de polymère qui gonfle. Lorsque le thermoplastique entre en contact avec la paroi, il se solidifie rapidement du fait de la faible température et acquiert ainsi sa forme finale. Cette technique permet notamment d'avoir une épaisseur très homogène en tout point du matériau. Cette technique génère **10% de déchets** qui sont recyclés par réintroduction dans le procédé.

A partir de ces informations[29], nous pouvons établir l'inventaire des émissions et extractions. Sachant que le film a une masse de 5 grammes et que 10% de déchets sont générés, cela signifie de **5,55 grammes** (= 5 ÷ 0,9) de matière doivent être introduit dans le procédé. Pour la mise en forme, c'est donc cette valeur qui sera retenue. Par contre, puisque ces 10% de déchets sont recyclé en boucle fermée directement dans le procédé, celui ne consommera réellement en matériaux que 90% de ce chiffre, soit 5 grammes. Pour notre inventaire, nous devons donc considérer :

- Pour la **mise en forme** : 5,55 grammes pour l'extrusion-soufflage, valeur à multiplier par le facteur d'émissions du procédé, trouvé dans la base de données ;
- Pour la **consommation de matière** : 5 grammes dont 4,65 grammes de LDPE et 0,35 de TiO_2, valeurs à multiplier par les facteurs d'émissions respectifs des deux matériaux.

Nous n'oublierons pas de ramener ces données à l'unité fonctionnelle par l'intermédiaire du **flux de référence**, qui est de 3/5 pour la purée surgelée. A nouveau, pour des raisons de concision, tous les résultats d'inventaire d'émissions et d'extractions ne pourront être repris, le tableau suivant regroupe quelques unes des substances émises, réparties en fonction du milieu récepteur. Pour rappel, les encres imprimées sur la poche ne sont pas considérées.

[29] Ces informations nous ont été transmises par le producteur de la poche considérée.

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]	
CO_2	0,0116
CH_4	5,84E-05
$PM_{2,5}$	2,05E-06
CO	1,26E-05
COVNM	1,53E-05
NO_x	2,28E-05
HCl	5,30E-07
Pb	2,25E-09
SO_2	3,52E-05
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]	
Fe	1,01E-07
Pb	2,84E-11
Cl^-	2,49E-07
Zn	1,38E-09
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]	
NH_4^+	3,59E-08
DBO_5	1,23E-05
DCO	3,57E-05
Hg	1,36E-09
Phosphates	1,45E-05
Sulfates	3,79E-04
Nitrates	4,63E-06
COT	1,16E-05

Tableau 6. Inventaire des émissions par UF de la poche (purée surgelée)

Nous pouvons notamment remarquer l'émission dans l'air de 11,6 grammes de dioxyde de carbone par unité fonctionnelle. Quant aux émissions dans l'eau, on constate une DCO près de trois fois supérieure à la DBO_5 ainsi qu'une valeur de près de 4 décigrammes pour les sulfates. Puisque l'emballage primaire est constitué uniquement de la poche, les résultats ci-dessus sont donc les résultats totaux de l'inventaire d'émissions pour cette partie du couple purée surgelée et emballage.

Enfin, on peut affirmer que les données issues d'Ecoinvent sont de **bonne qualité** car elles présentent peu d'incertitude et couvrent l'entièreté du système. Ainsi, les données relatives au dioxyde de titane

et au LDPE regroupent tous les procédés nécessaires à la production de ces derniers, depuis l'extraction de toutes les matières premières jusqu'à la sortie d'usine, ainsi que les étapes de transports et l'utilisation de l'infrastructure (à ne pas confondre avec la construction de celle-ci, qui n'est pas incluse). En ce qui concerne l'extrusion et le soufflage, les données rassemblent toutes les consommations d'énergie et d'intrants auxiliaires (hormis le polyéthylène). A nouveau, toutes ces valeurs chiffrées sont valables pour l'Europe occidentale et sont issues de la version 2010 d'Ecoinvent. La production d'électricité est basée sur le profil énergétique européen.

6.2.1.3. Comparaison des résultats

Nous disposons à présent des résultats d'inventaire des émissions et extractions de tous les éléments d'emballage primaire et ce pour chaque alternative. Nous pouvons donc comparer ceux-ci sur base de quelques unes des substances émises. Le tableau ci-dessous permet la comparaison. La colonne de l'alternative « purée fraîche » correspond donc à la somme des IVC intermédiaires de la barquette, du film et de l'étui en carton, la colonne de la purée surgelée ne concernant que la poche. On n'oubliera pas de prendre en considération les remarques concernant la qualité des données.

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
CO_2	0,0686	0,0116
CH_4	3,16E-04	5,84E-05
$PM_{2,5}$	1,18E-05	2,05E-06
CO	1,47E-04	1,26E-05
COVNM	7,84E-05	1,53E-05
NO_x	1,06E-04	2,28E-05
HCl	3,12E-06	5,30E-07
Pb	6,63E-08	2,25E-09
SO_2	1,63E-04	3,52E-05
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
Fe	9,25E-07	1,01E-07
Pb	7,63E-10	2,84E-11
Cl^-	6,45E-06	2,49E-07
Zn	3,83E-08	1,38E-09

EMISSIONS DANS L'EAU [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
NH_4^+	3,62E-06	3,59E-08
DBO_5	1,18E-04	1,23E-05
DCO	3,05E-04	3,57E-05
Hg	9,20E-09	1,36E-09
Phosphates	7,98E-05	1,45E-05
Sulfates	2,01E-03	3,79E-04
Nitrates	7,71E-05	4,63E-06
COT	1,47E-04	1,16E-05

Tableau 7. Comparaison des deux alternatives (emballage primaire)

On constate, par unité fonctionnelle, l'émission de 68,6 grammes de CO_2 pour la première alternative, soit près de six fois plus que pour la seconde. On observe un rapport du même ordre entre les émissions de composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) dans l'air et de mercure (Hg) dans l'eau des deux scénarios. Le plomb (Pb) dans l'air comme dans le sol et le zinc (Zn), présentent des résultats environ 30 fois supérieurs pour la première alternative.

Ces fortes différences pourraient en partie être le fait de la masse de matériaux utilisée dans chaque cas. Ainsi, l'emballage primaire de la purée fraîche totalise, tous composants compris, 39,65 grammes tandis que la poche LDPE de la purée surgelée présente une masse de 5 grammes, soit près de 8 fois moins, avec les conséquences que cela pourrait avoir sur les extractions de matières premières et l'énergie nécessaire à celle-ci, ainsi que pour tous les autres procédés et transports. Rappelons tout de même le fait que le facteur d'émissions de l'étui en carton (purée fraîche) inclut des données génériques sur les encres, qui par contre ne sont pas considérées dans le cas de la poche. Ceci peut notamment avoir des conséquences sur les résultats concernant les métaux lourds.

6.2.2. Emballage secondaire : purée fraîche

L'emballage secondaire de la purée fraîche sert exclusivement à la fonction de transport. Il pourrait dès lors être considéré comme un emballage tertiaire, bien qu'une palette soit encore utilisée pour le transport entre le site de production de la purée et le centre de distribution (cfr. infra). Il se présente sous la forme d'un cageot en **plastique** réutilisable pour plusieurs livraisons (cfr. photo ci-dessous).

Figure 13. Emballage secondaire de la purée fraîche : cageot réutilisable

Ce type de cageot est utilisé tant pour le transport entre le site de production et le centre de distribution que pour le transport entre ce dernier et les supermarchés Delhaize. Nous disposons de peu d'informations quant à cet emballage. Nous tenterons donc d'en évaluer les impacts environnementaux à partir des données de masse et d'hypothèses.

Le cageot est fabriqué en polymère thermoplastique, à savoir du **polypropylène**. Au vu de ses formes particulières et des nombreuses ouvertures sur ses flans, la technique de mise en forme la plus probable du matériau est l'**injection-moulage**, qui consiste en l'injection par une presse (dite d'injection) de la résine dans un moule dont les parois sont refroidies par courant d'eau. Au contact de celles-ci, la matière est refroidie et conserve la forme du modèle.

La masse du cageot est de **2,286 kg**. Bien qu'il soit réutilisable, celui-ci subit de nombreux chocs et contraintes physiques : sa durée de vie est donc limitée. Nous ne connaissons pas cette dernière ; nous poserons donc l'**hypothèse** d'une durée de vie de 20 livraisons, soit 20 allers-retours entre **deux sites**.

Au contraire de l'emballage secondaire de la purée surgelée (cfr. infra) qui est conservé depuis le site de production jusqu'au supermarché, le cageot est vidé en arrivant au centre de distribution (DC), puis remplit à nouveau en fonction des commandes de chaque magasin. Il faut donc compter **2 allers-retours** entre le site de production et le supermarché, puisque que le cageot utilisé pour le transport

vers le site intermédiaire qu'est le DC n'est pas le même que celui servant à la livraison des magasins. Le schéma suivant illustre le problème :

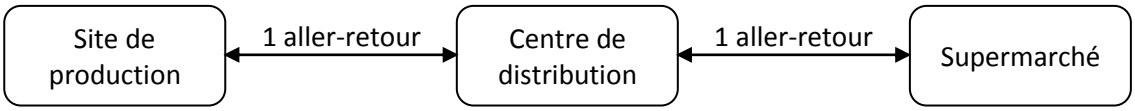


Figure 14. Schéma de l'utilisation des cageots en plastique (purée fraîche)

Sachant qu'un cageot contient 28 articles de purée fraîche, on peut donc attribuer la part d'1/28ème d'emballage par unité de vente. Cependant, un cageot a, selon l'hypothèse, une durée de vie de 20 allers-retours. Puisqu'un article « consomme » un aller-retour par cageot utilisé, soit 1/20ème de leur durée de vie, et ce pour deux cageots, on peut donc déduire :

Part d'emballage secondaire affectable à une unité de vente : $\frac{1}{28} \cdot \left(\frac{1}{20} + \frac{1}{20}\right) = \mathbf{\frac{1}{280}}$

Sur son cycle de vie, un article de purée fraîche utilisera 1/280ème de cageot en plastique.

Nous pouvons dès lors établir l'inventaire des émissions et extractions. Celui-ci inclura la production de 2,286 kg de polypropylène ainsi que la mise en forme par injection-moulage dont les facteurs d'émissions seront issus de la base de données. Les résultats seront alors ramenés à l'unité fonctionnelle grâce au rapport obtenu ci-dessus. Le tableau suivant reprend quelques substances émises pour une unité fonctionnelle d'emballage secondaire, classées en fonction des différents milieux récepteurs :

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]	
CO_2	2,41E-02
CH_4	1,21E-04
$PM_{2,5}$	3,29E-06
CO	5,55E-05
Xylène	4,14E-08
NO_x	4,45E-05
HCl	8,89E-07
Pb	2,92E-09
SO_2	5,74E-05

EMISSIONS DANS LE SOL [kg]	
Fe	1,06E-07
Pb	3,40E-11
Cd	3,88E-12
Zn	1,94E-09
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]	
NH_4^+	5,79E-08
DBO_5	1,63E-05
DCO	2,75E-05
Cl^-	5,89E-05
Hg	2,00E-09
Nitrates	7,09E-06
Sulfates	5,26E-04
COT	9,04E-06

Tableau 8. Emballage secondaire de la purée fraîche : inventaire des émissions et extractions par UF

On peut affirmer que les données, issues de la version 2010 d'Ecoinvent, sont de bonne qualité. Le facteur du polypropylène regroupe les données agrégées de tous les procédés de production depuis l'extraction des matières premières jusqu'au produit fini, y compris le transport des intrants intermédiaires. Le procédé d'injection-moulage comprend toutes les entrées de matières (hors PP) et d'énergie. Les données relatives à la production d'électricité sont basées sur le **profil énergétique européen**.

6.2.3. Emballage secondaire : boite en carton (purée surgelée)

Tous les procédés intervenant dans le cycle de vie des deux alternatives ne peuvent pas être décrits en détails dans le présent mémoire, tant ils sont nombreux et souvent complexes. Afin d'illustrer cette complexité, il reste cependant intéressant d'étudier de plus près l'un d'entre eux. La société productrice du carton d'emballage secondaire de la purée surgelée, Cartonnage Lammerant, nous ayant ouvert ses portes, le procédé de production du carton a été étudié en détail. A l'inverse des informations génériques disponibles dans les différentes bases de données et utilisées pour la réalisation de cet inventaire de cycle de vie, les informations et les chiffres recueillis et décrits dans ce sous-chapitre sont les données correspondant exactement à la purée étudiée. Nous espérons dès lors être plus proches de la réalité avec ces données.

6.2.3.1. Le carton ondulé : notions de base

L'emballage secondaire de la purée surgelée se présente sous la forme d'une boite dite « américaine »[30] en carton ondulé[31]. Celui-ci est constitué d'une ou plusieurs feuilles de papier cannelé collées à une ou plusieurs feuilles de papier plan. Par ailleurs, il existe plusieurs types de structure pour le carton ondulé, dont la différence se situe au niveau du nombre de couches planes et ondulées. Ainsi, la norme ISO 4046 recense quatre types de structures :

- Le carton ondulé simple face (*single face* en anglais) composé d'une couche de plane collée à une couche ondulée
- Le carton ondulé double face (*single wall* en anglais) composé d'une couche ondulée collée entre deux couches planes (cfr. figure ci-dessous)
- Le carton ondulé « double-double » (*double wall* en anglais) qui possède une structure à cinq couches dont deux cannelures (cfr. figure ci-dessous)
- Le carton ondulé « triple » (*triple wall* en anglais) dont la structure à sept couches est composé de trois couches ondulées et de quatre couches planes.

La figure ci-dessous représente les deux structures les plus couramment rencontrées dans l'industrie, à savoir le carton double face et le « double-double ».

[30] La boite ou caisse américaine est une boite possédant quatre rabats sur les parties supérieure et inférieure.
[31] Il existe en effet d'autres types de cartons comme par exemple le carton laminé ou le carton bois.

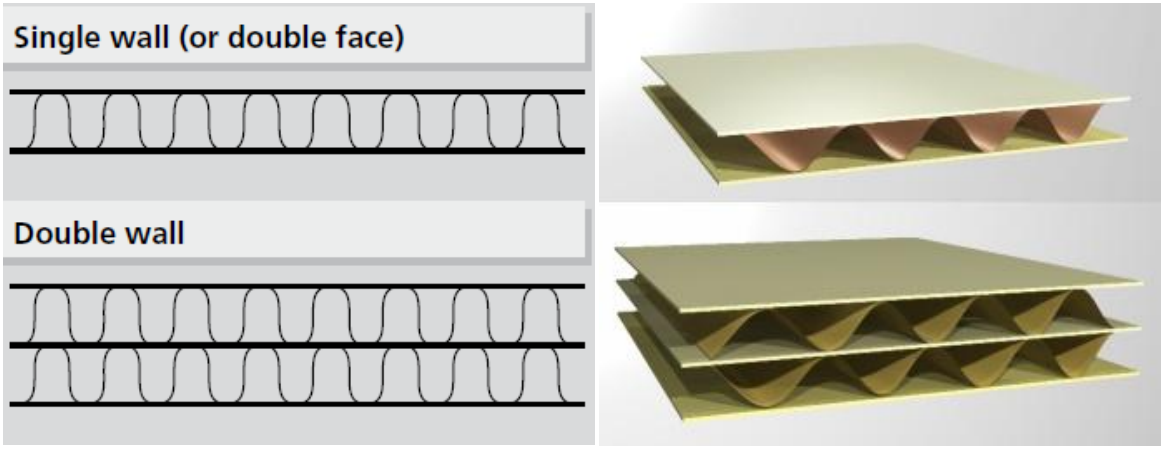


Figure 15. Carton ondulé double face et « double-double »
Source : FEFCO (2009)

La robustesse du produit emballé est la principale raison du choix entre l'une ou l'autre structure. Ainsi, plus le contenu de la boite en carton est robuste, moins le carton devra l'être. En termes de denrées alimentaires, les aliments surgelés sont considérés comme plus résistants aux chocs et nécessitant moins de soutien : le produit est alors qualifié de « porteur ». C'est évidemment le cas de la purée surgelée dont l'emballage secondaire est donc constitué d'un carton ondulé **double face**.

La masse surfacique (ou grammage) de chacune des couches de papier est variable et influence elle aussi la solidité et la rigidité de la plaque de carton. Dans les applications de carton ondulé, le grammage s'échelonne de 90 à 250 grammes par mètre carré (g/m²) (pour une couche).

Enfin, trois types de papier peuvent être utilisés pour la formation des différentes couches, et dont la distinction est basée sur l'origine des fibres utilisées et la qualité du papier :

- Le « kraftliner » : il s'agit du papier neuf ou vierge, dans le sens qu'il est issu de la filière de production de pâte à papier et non d'une filière de papier recyclé. Son grammage est d'au minimum 125 g/m². Dans le cas du carton ondulé, il est utilisé pour les couches planes intérieures ou extérieures. Ce papier est de qualité supérieur et donc caractérisé par un prix élevé.

- Le « testliner » : le testliner est un papier recyclé de haute qualité[32], produit à partir de fibres issues d'une filière classique de recyclage des papiers et cartons, et dont le grammage est d'au minimum 125 g/m². Dans les applications en carton ondulé, il peut être utilisé pour les couches planes intérieures ou extérieures. Il est meilleur marché que le kraftliner.

[32] Il existe trois qualités de testliner : T1, T2 et T3 (T1 étant la plus élevée) qui sont fonction de la résistance au déchirement (« Burst Index » en anglais) calculé en kPA (kiloPascal) et normalisé par l'ISO 2759.

- Le « wellenstof »[33] (ou « recycled medium ») : le wellenstof est un papier recyclé de plus faibles qualité et grammage (à partir de 90 g/m²). Il est typiquement utilisé pour les couches ondulées et se caractérise par un prix peu élevé.

Le choix du type de papier pour une couche donnée est laissé au client en fonction des contraintes physiques que devra supporter la boite ainsi que des exigences de qualité et coûts.

6.2.3.2. La production du carton

Description du procédé de production

- Première étape : l'assemblage à l'onduleuse

La première partie de la ligne de production est celle de l'onduleuse. Cette machine sert à fabriquer la partie cannelée du carton et à assembler celle-ci à la partie plane, pour ainsi former ladite plaque de carton.

L'onduleuse se présente sous la forme d'une longue ligne de production continue. En début de ligne, d'imposants rouleaux de papier (« kraftliner », « testliner », « wellenstof » - cfr. supra) sont déroulés tandis que les longues feuilles qui les composent sont emportées par des cylindres préchauffant. La première étape est, comme le nom l'indique, l'ondulation du papier « wellenstof » grâce à des cylindres chauffants cannelés prévus à cet effet.

Ensuite, la couche supérieure, faite de « kraftliner » ou de « testliner » (couche plane – cfr. supra), est simultanément apposée et collée à la partie ondulée. Sur le cylindre suivant, la couche plane inférieure est ajoutée. Dans le cas d'une structure à cinq couches (« double-double »), l'opération est répétée une seconde fois et est suivie d'une étape de regroupement des deux structures simples.

Le carton ainsi constitué passe ensuite sur un tapis chauffé à la vapeur dans le but de faire sécher colle et papier et donc de durcir l'ensemble. Ce dernier est alors soumis à un dispositif, appelé « coupe-rives », servant à rogner les côtés pour les rendre parfaitement rectilignes. On retiendra que les rognures constituent des déchets de coupe qui seront valorisés (cfr. infra) ; un système d'aspiration, formé par une tuyauterie à la base de laquelle une hélice crée la dépression, emporte les rognures de carton vers le système de traitement. Ensuite, la longue plaque de carton sans fin[34] passe par mécanisme, appelée « mitrailleuse », qui réalise une première **coupe sur la largeur**.

La longue plaque de carton est ensuite **coupée sur la longueur**, en fonction des dimensions souhaitées. Il n'y a, dans ce cas, pas de rebuts puisque d'une longue plaque continue sont formées

[33] Terme le plus couramment utilisé en Europe
[34] En effet, la plaque de carton n'a pas encore été découpée, elle est donc encore reliée au rouleau du début de ligne.

plusieurs plaques. La production sort alors de la ligne et est triée automatiquement. A la fin de l'étape d'ondulation, le carton est chaud et doit être laissé au repos ; il est temporairement stocké.

- Seconde étape : la transformation

Tout d'abord, les plaques de carton sont introduites dans la deuxième partie de la chaîne de production par un dispositif appelé « slotter » pour directement passer à l'impression par flexographie. L'imprimante dispose d'un panel de 6 couleurs de base. Si une couleur supplémentaire est requise, il est possible de procéder à un mélange d'encre hors de la ligne de production. A chaque changement de commande, les porte-clichés et les cylindres doivent être rincés à l'eau (cfr. infra).
Ensuite, des entailles sont réalisées dans les plaques par un mécanisme de couteaux. Ces entailles formeront les futures zones de plis ou de rabats pour former la boite en carton. Il se peut également que des entailles décoratives aux formes particulières soient demandées par les clients. Evidemment, ces coupes produisent des déchets de coupe. Ces rebuts tombent dans une fosse au fond duquel circule un tapis roulant qui les transporte alors vers l'installation de traitement des déchets de carton.
Enfin, un dernier point de colle est appliqué afin de rattacher les deux extrémités de la boite, qui est alors pliée sur elle-même pour garder une forme plate pour le transport et le stockage. Les boites sont ensuite comptées automatiquement pour finalement être disposées sur des palettes.

- Traitement interne des déchets de carton

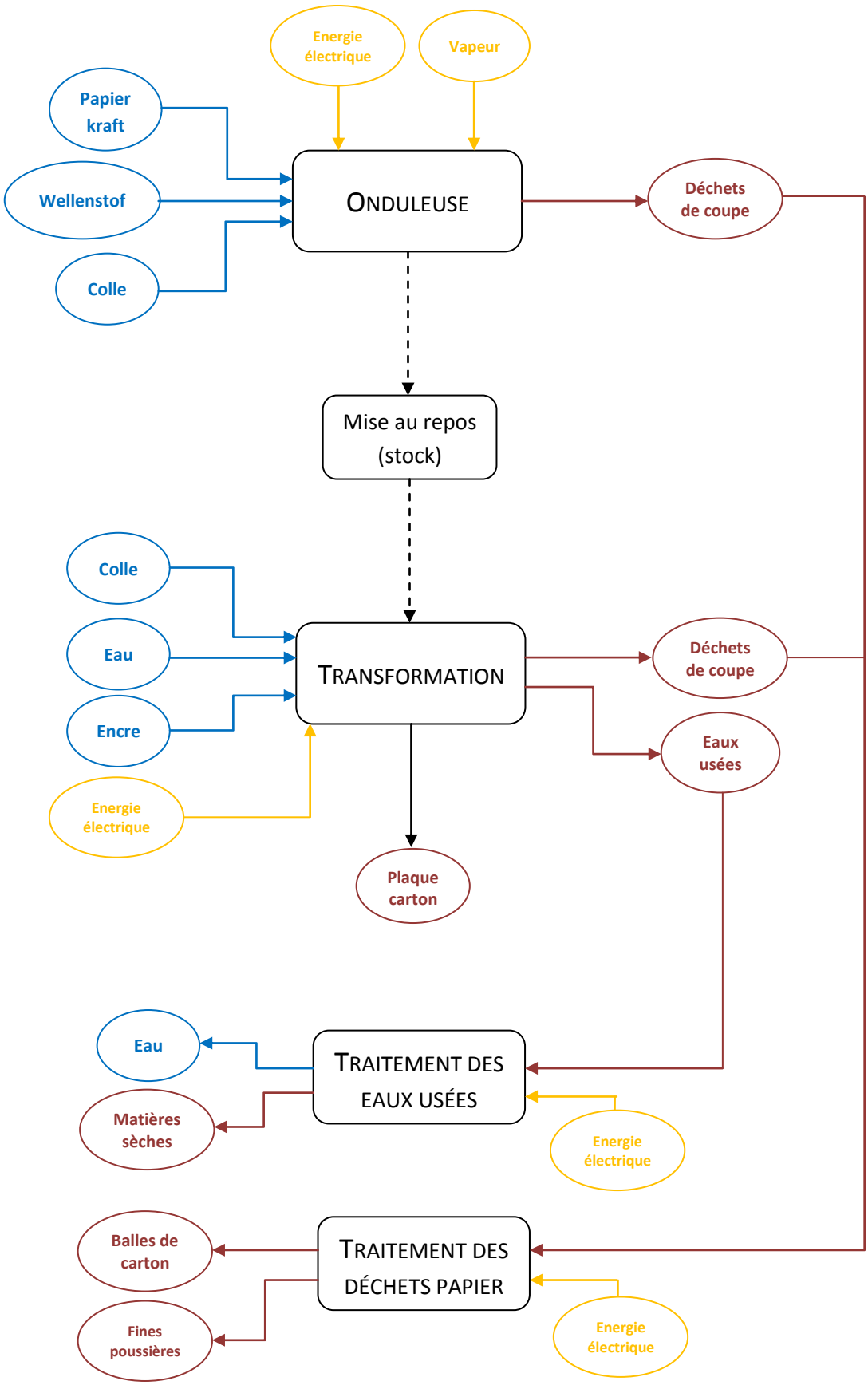
Les déchets de coupe sont amenés, soit par le système d'aspiration de la ligne d'assemblage à l'onduleuse, soit par le tapis roulant de la ligne de transformation, à l'unité de traitement. Certaines découpes, notamment le « coupe-rives », génèrent des rebuts de taille très faible, dont une partie se présente sous la forme de poussières. Celles-ci sont séparées mécaniquement pour isoler les plus fines d'entre elles, dont la trop faible granulométrie empêche toute compaction.

Les déchets de coupe et les poussières de taille suffisante sont alors envoyés vers une presse afin d'être compactés en balles qui seront valorisées par une entreprise de recyclage de papier. Les poussières non compactables sont, quant à elle, disposées en container et destinées à l'incinération.

- Traitement des eaux usées

Toutes les eaux souillées par le processus de production sont traitées par une station d'épuration interne à l'entreprise. Après une étape de décantation sommaire, une boue constituée d'eau de rinçage et d'encre est récupérée, filtrée sur une membrane en céramique par un procédé d'ultrafiltration tangentielle puis coulée sur un cylindre chauffant afin de réduire progressivement la proportion d'eau par évaporation pour finalement obtenir un résidu sec à l'aspect poudreux. Cette poudre pourra ensuite être valorisée énergétiquement dans les fours de cimenterie grâce à un pouvoir calorifique relativement élevé.

- Diagramme général du procédé de production (figure 16)



6.2.3.3. Inventaire de production

Un inventaire de production est ici réalisé pour le carton d'emballage secondaire de la purée surgelée. En premier lieu, on étudiera la structure de la boite en carton. Ensuite, on établira un bilan qualitatif des entrées en sorties de matière et d'énergie pour l'ensemble du procédé de production. Enfin, les calculs nécessaires à l'inventaire de production seront effectués pour finalement pouvoir calculer l'inventaire des émissions et des extractions ramenées à l'unité fonctionnelle.

Structure de la boite en carton[35]

Pour des raisons de robustesse détaillées plus haut, la boite destinée à transporter les articles de purée surgelée est composée d'un carton présentant une structure à 3 couches. Les couches extérieures (planes) sont constituées de « **kraftliner** » tandis que la couche intérieure (ondulée) est en « **wellenstof** ».

La couche ondulée possède une caractéristique supplémentaire : le **coefficient d'ondulation**. En effet, la taille des ondulations a un impact non négligeable sur la longueur réelle de papier utilisé. Plus le coefficient est élevé, plus l'ondulation consommera de papier. Visuellement, cela se traduit par une couche plus épaisse, comme l'indique la photo ci-dessous :

Figure 17. Coefficient d'ondulation

Enfin, la boite en carton présente, avant pliage, une surface totale fonction des dimensions demandées par le client. Ainsi, la boite considérée décrit une aire 0,76 m². Le tableau suivant, résume toutes les données de masse et de surface et nous permet de calculer la masse totale de la boîte en carton :

[35] Toutes les données utilisées pour les calculs nous ont été fournies par l'entreprise.

	Carton purée surgelée		
Surface [m²]	0,761		
Couches	3		
	Grammage [g/m²]	Coefficient	Masse [g]
Couche 1	180	1	137,0
Couche 2	140	1,5	159,8
Couche 3	180	1	137,0
Total [g]			433,8

Tableau 9. Masse de la boite en carton ondulé

Les déchets de coupe sont, quant à eux, quantifiés en termes de surface équivalente calculée sur la surface de la plaque en carton. On peut dès lors calculer la masse de ces rebuts de la même manière que pour la masse de la boite :

	Déchets de carton		
Surface éq. [m²]	0,0121		
Couches	3		
	Grammage [g/m²]	Coefficient	Masse [g]
Couche 1	180	1	2,2
Couche 2	140	1,5	2,5
Couche 3	180	1	2,2
Total [g]			6,9

Tableau 10. Masse des déchets de carton

En résumé, la boite en carton se caractérise par une masse totale de 434 grammes dont **274 grammes de « kraftliner »** (couches 1 et 3) et **160 grammes de « wellenstof »** (couche 2), ainsi qu'une production de 6,9 grammes de déchets par boite.

Bilan qualitatif : matière et énergie

Toutes étapes confondues, on distingue plusieurs **entrées** de matières et d'énergie :

- Le papier : « kraftliner » et « wellenstof ».
- La colle : la colle sert à fixer les couches planes du carton sur les couches ondulées. Elle est fabriquée sur le site de production à partir d'**amidon** de maïs, d'**eau** dont une partie est ajoutée en phase vapeur, de **soude caustique**, de tétraborate de sodium décahydraté ($Na_2B_4O_7\ 10H_2O$), aussi appelé **borax**, et de **formaldéhyde**. On retiendra que l'eau utilisée dans la fabrication de la colle

est soit une eau de pluie récoltée sur les toits des bâtiments de l'entreprise, soit une eau épurée provenant du système de traitement des eaux usées de l'entreprise (cfr. supra).

- L'énergie électrique : l'électricité servant à actionner la machinerie est distribuée à l'entreprise par le réseau haute tension, pour ensuite être convertie en basse tension par deux transformateurs.
- La vapeur d'eau : la vapeur d'eau est utilisée comme fluide caloporteur. Elle sert en effet à chauffer les cylindres de l'onduleuse ainsi que le tapis chauffant servant au séchage de la colle, mais intervient également dans la fabrication de celle-ci. Elle est produite par une chaudière « 10 tonnes » fonctionnant au mazout. Le circuit de la vapeur ne fonctionnant pas totalement en circuit fermé, de l'eau doit régulièrement être introduite dans le système. Cette eau est une eau de citerne récoltée sur le toit des bâtiments, légèrement adoucie.
- Le mazout : il est utilisé pour générer la vapeur.
- Les encres : concernant la boite en carton étudiée, la quantité d'encre utilisée est très faible, car les impressions sont réduites. Malheureusement, nous ne disposons pas de données suffisantes en termes de quantité consommée et de composition. Les encres ne seront donc pas reprises dans les calculs d'inventaire.
- L'huile lubrifiante : elle sert notamment à la lubrification des engrenages.

Les **sorties**, outre la boite en carton, sont les suivantes :

- Les déchets de coupe : provenant des étapes de d'assemblage à l'onduleuse et de transformation, ils peuvent représenter jusqu'à 30% de la surface[36] de la boite. Ils sont de deux types : les balles de carton et les fines poussières. Ces déchets sont valorisés (cfr. supra).
- Les eaux usées : l'eau souillée par les encres est envoyée vers la station d'épuration interne à l'entreprise (cfr. supra).

Calculs d'inventaire de production

Il s'agit dans cette section de calculer la quantité exacte de matière et d'énergie imputable à la fabrication d'une boite destinée à l'emballage secondaire de la purée surgelée, et ce à partir des chiffres de production.

- Données de production

La **colle** est un intrant particulièrement important car elle est composée de nombreuses substances qu'il faut inventorier de manière exacte. En fait, elle se révèle être un mélange précis de trois

[36] Le cas extrême de 30% est typique d'une boite en carton comportant de nombreuses découpes de décoration.

préparations distinctes : primaire, secondaire et soude caustique, consommées dans des proportions différentes. L'entreprise nous a fournit les données suivantes :

- Préparation primaire : 600 kg consommés par heure de production, avec par préparation :
  - Eau : 235 kg
  - Amidon de maïs : 60 kg
  - Formaldéhyde : 1,5 kg

- Préparation secondaire : 3500 kg consommés par heure de production, avec par préparation :
  - Eau : 310 kg
  - Amidon de maïs: 138 kg
  - Borax : 2,1 kg
  - Formaldéhyde : 0,15 kg

- Soude caustique : 48 kg par heure

La consommation mensuelle de **mazout** s'élève en moyenne à **20 000 litres**, tandis que la consommation d'**eau** pour la vapeur est de 70 m³ par semaine, soit **280 m³** par mois.

La consommation mensuelle totale d'électricité pour toutes les étapes de production, transformation, gestion automatisée des stocks et traitement des déchets de carton et des eaux usées s'élève à **565 905 kWh**[37] (kiloWatt·heure). Ajoutons encore l'huile minérale consommée à raison de 400 kg par an, soit **33,33 kg** par mois.

Toutes ces entrées correspondent à la production mensuelle de **9 170 420 m²** de carton[38], tous types de structures de plaque de carton confondus. La prochaine étape est de ramener ces données à la production d'un mètre carré de carton.

- Etapes de calculs

Etant donné que de nombreuses données de consommation sont exprimées par mois, il convient de ramener tous les chiffres à cette même unité de temps.
Pour la colle, le tableau suivant nous permet de calculer la consommation totale mensuelle, sachant qu'un mois de production équivaut à 200 heures, par type de composant, à partir des données détaillées ci-dessus :

[37] Chiffre du mois de juin 2010
[38] Chiffre du mois de juin 2010

	Primaire	Secondaire	Soude caustique (Na OH)	
Consommation horaire générale [kg/h]	600	3500	48	
Composition d'un mélange :				
Eau [kg]	235	310	0	
Amidon [kg]	60	138	0	
Formaldéhyde [kg]	1,5	0,15	0	
Borax [kg]	0	2,1	0	
Soude caustique [kg]	0	0	1	
Masse totale d'un mélange [kg]	296,5	450,25	1	
Nombre de mélange par heure	2,02	7,77	48	
Nombre de mélange par mois (200 heures prod./mois)	404,7	1554,7	9600	
Consommation mensuelle par composant :				**Total**
Eau [kg/mois]	95109,6	481954,5	0	**577064,1**
Amidon [kg/mois]	24283,3	214547,5	0	**238830,8**
Formaldéhyde [kg/mois]	607,1	233,2	0	**840,3**
Borax [kg/mois]	0,00	3264,8	0	**3264,8**
Soude caustique [kg/mois]	0,00	0,00	9600	**9600**
Total [kg/mois]	120000	700000	9600	

Tableau 11. Consommation mensuelle des différents composants de la colle

Un autre problème se pose en ce qui concerne la colle. En effet, nous connaissons la surface mensuelle produite de **9 170 420 m²**, mais celle-ci ne fait pas la distinction entre le carton « double face » et le « double-double ». Or, pour ce dernier, la consommation de colle est **deux fois supérieure** puisqu'il y a quatre surfaces à coller contre deux pour le « double face ». Il faut donc exprimer la surface produite en surface équivalente « double face ». Sachant que le celui-ci représente 90% de la production contre 10% pour le « double-double », l'encadré suivant détaille l'équivalence recherchée :

Surface « double face » : 9 170 420 · 0,9 = 8 253 378 m²
Surface « double-double » : 9 170 420 · 0,1 = 917 042 m²

Surface équivalente pour le « double-double » : 917 042 · 2 = 1 834 084 m²
Surface équivalente totale : 8 253 378 m² + 1 834 084 m² = 10 087 462 m²

On peut dès lors calculer la consommation de chacune des entrées en matière (hors papier) et en énergie par mètre carré de carton en divisant la consommation mensuelle par la surface mensuelle de

carton produite, en gardant à l'esprit que la consommation des composants de la colle doit être divisée par la surface équivalente en « double face », à savoir 10 087 462 m². Le tableau suivant regroupe les résultats de calcul :

		Consommation mensuelle	Consommation par m² de carton
COLLE	Eau [kg]	577064,08	0,0572
	Amidon [kg]	238830,77	0,0237
	Formaldéhyde [kg]	840,28	8,330E-05
	Borax [kg]	3264,85	3,236E-04
	Soude caustique [kg]	9600	9,517E-04
AUTRES	Mazout [kg]	20000	2,189E-03
	Eau (vapeur) [kg]	280000	0,0305
	Huile minérale [kg]	33,33	3,635E-06
	Electricité [kWh]	565905	0,0617

Tableau 12. Consommation d'intrants par mètre carré de carton

Enfin, nous pouvons ramener ces résultats à une boite en carton, donc à une surface de 0,761 m², et y inclure la consommation de papier et les déchets pour finalement les adapter à l'**unité fonctionnelle** en sachant qu'une boite en carton contient **12 unités de vente de purée surgelée**, sans oublier **le flux de référence de 3/5**. L'inventaire de production pour l'emballage secondaire de la purée surgelée est alors complet. Le tableau ci-dessous présente les données de l'inventaire de production par UF :

		Par boite	Par unité fonctionnelle
Intrants	Kraftliner [kg]	0,274	0,0137
	Wellenstof [kg]	0,1598	7,990E-03
	Eau [kg]	6,677E-02	3,338E-03
	Amidon [kg]	1,802E-02	9,009E-04
	Formaldéhyde [kg]	6,339E-05	3,170E-06
	Borax [kg]	2,463E-04	1,231E-05
	Soude caustique [kg]	7,242E-04	3,621E-05
	Mazout [kg]	1,660E-03	8,298E-05
	Huile minérale [kg]	2,766E-06	1,383E-07
	Electricité [kWh]	4,696E-02	2,348E-03
Sortant	Déchets de carton [kg]	0,0069	3,450E-04

Tableau 13. Inventaire de production pour le carton d'emballage secondaire

6.2.3.4. Inventaire des émissions et des extractions

Maintenant que l'inventaire de production de l'emballage secondaire est établi, il nous faut encore multiplier ces flux intermédiaires par leurs facteurs d'émissions et d'extraction respectifs, disponibles dans la base de données Ecoinvent. Pour des raisons de concision et de clarté, on ne détaillera pas les émissions et extractions de chaque flux intermédiaires. En effet, la base de données nous donne quelques 1295 types d'émissions et d'extractions différents, réparties entre les milieux récepteurs, à savoir l'eau, l'air et le sol. Le tableau suivant reprend quelques uns des résultats d'inventaire d'émissions pour une unité fonctionnelle :

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]	
CO_2	0,00534
CH_4	3,198E-05
$PM_{2,5}$	3,23E-05
CO	9,36E-06
Xylène	8,49E-08
NO_x	1,02E-05
CFC-11	1,80E-06
Pb	7,01E-08
SO_2	1,79E-05
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]	
Fe	2,65E-04
Pb	3,33E-07
Cd	8,26E-10
Zn	5,77E-08
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]	
NH_4^+	1,24E-06
DBO_5	7,15E-05
DCO	2,16E-04
Cd^+	3,83E-08
Cl^-	1,15E-04
Hg	3,72E-08
Nitrates	7,98E-05
COT	4,41E-05

Tableau 14. Emballage secondaire (purée surgelée) : inventaire d'émissions ramené à une UF

Ce tableau est le résultat de la somme des produits de multiplication des valeurs d'inventaire de production par le facteur d'émissions et d'extraction approprié de chaque substance intermédiaire. Une particularité concernant le mazout est à signaler. En effet, le mazout n'est pas simplement consommé pour la fabrication du produit comme les autres composants. Il subit une combustion, qui est utilisée pour produire la vapeur. En plus du facteur d'émissions lié à la production du mazout, il nous faut ajouter le facteur d'émissions correspondant à sa combustion dans une chaudière. Par ailleurs, l'eau n'a pas été incluse dans les calculs d'inventaire d'émissions puisqu'il s'agit d'une eau de pluie récoltée, dont une partie est traitée en interne et tourne donc en circuit quasi fermé. L'électricité nécessaire au traitement des eaux usées est par contre comprise dans le total de l'électricité de l'inventaire de production. Le tableau ci-dessus comprend donc également ces émissions et extractions.

En ce qui concerne la **qualité des données**, il convient de préciser les choses suivantes :

- Pour l'**amidon de maïs**, les facteurs d'émissions incluent toutes les étapes de production de cette substance depuis les extractions de matière première, ainsi que le traitement des eaux de procédé. L'utilisation de l'infrastructure (machine, bâtiment, etc.) est également comprise.
- Pour le **Borax**, la base de données reprend toutes les étapes de production, matières premières et les transports. Le traitement des déchets solides n'est par contre pas pris en compte dans le facteur d'émissions.
- Le facteur d'émissions du papier « **kraftliner** » comprend toutes les étapes, matières et traitements des déchets.
- Concernant le papier « **wellenstof** », les remarques sont identiques à celle du « kraftliner ».
- Pour l'**huile de lubrification**, toutes les étapes et matières consommées sont incluses sauf le traitement des déchets de production. Signalons que les auteurs de la base de données indiquent une incertitude relativement élevée, due aux faibles quantités d'informations qui ont pu être recueillies concernant certaines phases de production.
- Les facteurs concernant le **mazout** incluent tous les procédés de raffinage et les matières premières extraites, ainsi que le traitement des déchets.
- Concernant la **soude**, toutes les matières premières, procédés, transports sont compris ainsi que l'utilisation de l'infrastructure.
- Pour le **formaldéhyde**, les facteurs d'émissions reprennent tous les intrants et procédés depuis l'extraction de matière.
- Enfin, toutes ces données sont valables pour l'Europe occidentale et sont issues de la base de données Ecoinvent, dans sa version 2010. L'électricité considérée dans tous ces facteurs d'émissions et d'extraction se réfère au profil énergétique européen.

6.2.4. Procédés de transport

6.2.4.1. Problèmes d'affectation

Pouvant paraître simples, les procédés de transport sont en fait particulièrement malaisés à quantifier du point de vue de l'impact environnemental lorsqu'il s'agit de les ramener à l'unité fonctionnelle. En effet, il existe de nombreux types de camions différant par la charge maximale autorisée, qui, plus elle est élevée, plus elle est synonyme d'une importante consommation absolue de carburant, mais d'une plus faible consommation par tonne-kilomètre. On distingue notamment les camions 16 tonnes, 28 tonnes et 40 tonnes. De plus, ceux-ci sont rarement destinés à transporter un seul et unique produit ou article sur une seule et même distance. Si on prend l'exemple du borax dans la production de carton ondulé, dont la consommation est d'environ 3200 kg par mois (cfr. supra), il est fort probable que le camion qui sert à la livraison hebdomadaire de 800 kg de cette substance, serve dans la même journée à transporter 2 tonnes chez un autre utilisateur situé à 100 km du premier, puis 2 autres tonnes à un troisième utilisateur situé à 200 km du second, etc. Ce même camion peut également transporter d'autres matériaux plus volumineux ou plus denses, pour une même tournée de livraison.

Ceci nous amène au très délicat problème d'affectation posé par le transport de produits intermédiaires ou finis. Il nous est impossible, dans les limites de l'information mise à notre disposition et du temps imparti pour la réalisation du présent mémoire, de résoudre les problèmes d'affectation pour chaque procédé de transport. Nous opérons donc une sélection, pour ne retenir que les flux relatifs aux couples produit-emballage entiers, ce qui correspond à exclure le transport lié uniquement au transport des éléments composant l'emballage, par exemple le borax ou le polypropylène dans le cas de la barquette. Ceci nous conduit à opérer une distinction entre quatre types de procédés de transport, basée sur le niveau de l'élément transporté dans le cycle de vie du couple considéré dans son entièreté :

- Le **transport des matières extraites** : ces flux de transport et leurs charges environnementales sont inclus dans les différents facteurs d'émissions issus de la base de données. Lorsque plusieurs procédés de fabrication sont nécessaires pour arriver au dernier produit intermédiaire, tous les flux de transports y afférant sont également compris. Ainsi, tant le transport du naphta nécessaire à la production de propylène que le transport de ce dernier pour la fabrication de polypropylène sont repris dans les facteurs de la base de données.
- Le **transport des composants intermédiaires** ou des composants « finis » : typiquement le cas du transport des produits intermédiaires vers le site de mise en forme (exemple : transport du LDPE destiné au calandrage) et du transport de composants « finis » avant association du produit et de l'emballage (par exemple : transport des barquettes en PP jusqu'au site de production de la purée), ces transports ne seront pas retenus dans l'analyse de cycle de vie, pour les raisons évoquées plus haut.

- Le **transport du couple entier**, formé par la purée et ses emballages primaires et secondaires : celui-ci correspond exactement aux **deux types de transports réfrigérés** (4°C ou -18°C), qui seront pris en compte dans la présente ACV.
- Le **transport des composants en fin de vie vers un centre de traitement** : emballages primaires via le ramassage des déchets ménagers et emballage secondaire transporté par Delhaize. Ce type de transport ne sera pas retenu dans les calculs d'inventaire.

Rappelons que le transport de l'unité de vente entre le supermarché et le domicile du consommateur est exclu de l'ACV puisqu'il s'agit d'un procédé commun aux deux alternatives.

6.2.4.2. Alternative 1 : purée fraîche

L'on distingue **deux étapes** de transport réfrigéré à 4°C, à savoir le trajet entre le site de production et l'unique centre de distribution (DC) de Delhaize, et l'acheminement des produits depuis le DC jusqu'au supermarché.

Première étape

La distance entre le site de production de la purée et le DC est de 49 km, ce qui équivaut à une durée du trajet de 36 minutes. Le véhicule utilisé pour ce transport est un camion 28 tonnes (deux essieux).

Les articles de purée sont groupés dans des cageots réutilisables (cfr. supra), à raison de 28 unités de vente par cageot, qui sont ensuite placés sur palette, regroupant 32 de ceux-ci. Enfin, un camion peut transporter 33 palettes. On peut donc transporter 29568 unités de vente (= 28·32·33) par camion. Bien que le véhicule ne transporte pas uniquement des articles de purée fraîche, nous pouvons calculer la « part de camion » consommée par article.

L'**allocation** se fera dans ce cas sur base de ces données logistiques, ce qui nous permettra de déterminer les charges environnementales imputables à une unité de vente en fonction de la distance parcourue.

Autre information importante, le déplacement du véhicule et la réfrigération sont effectuées par deux moteurs indépendants l'un de l'autre. Ainsi, la réfrigération consomme en moyenne 5 litres[39] de diesel par heure de trajet, soit une consommation **de 3 litres** pour cette première étape de 36 minutes.

Nous pouvons dès lors établir l'inventaire de cycle de vie, à partir des facteurs d'émissions et d'extraction adéquats, à savoir celui du fonctionnement d'un camion 28 tonnes (norme EURO5) exprimé en véhicule-kilomètre et celui de la combustion du diesel pour la réfrigération. Nous

[39] La consommation de carburant pour la réfrigération est en réalité fonction de la température extérieure. Ainsi, lors d'une journée d'hiver à 3°C, le moteur ne sera pas utilisé. Par contre, pour une journée d'été à 25°C, la consommation en diesel sera élevée. Le chiffre de 5 litres est donc une valeur moyenne annuelle, transmise par le responsable des transports du groupe Delhaize.

n'oublierons pas de ramener les résultats à une unité fonctionnelle ; ceux-ci seront additionnés à ceux de l'étape suivante et présentés en comparaison des résultats de la seconde alternative (cfr. infra).

Seconde étape

Sur le second trajet, les produits sont acheminés depuis le DC jusqu'au supermarché. Le problème de la distance effective à considérer se pose immédiatement puisque les supermarchés Delhaize sont nombreux et répartis sur l'ensemble du territoire belge, le centre de distribution se trouvant à Zellik, au nord-ouest de Bruxelles. Bien que le nombre de supermarchés soit plus important dans les grandes villes du pays, dont Bruxelles, Gand et Anvers, qui se trouvent à des distances assez faibles du DC (moins de 50 km), des villes plus éloignées comme Arlon, Liège ou Tournai correspondent à des trajets beaucoup plus longs. Nous poserons l'**hypothèse** d'une **distance moyenne parcourue de 80 km**, soit une durée[40] de trajet de 1h15.

Concernant la logistique, les données sont légèrement différentes. En effet, pour cette seconde étape, les cageots ne sont plus transportés sur palette mais sur des « dolly », sorte de structure sur roues (cfr. photo ci-dessous) pouvant supporter **16 cageots**.

Figure 18. Photographie d'un « dolly »

Un camion peut contenir 80 « dolly », ce qui permet le transport de 35840 (= 28·16·80) unités de vente de purée fraîche. Cependant, les camions effectuant cette deuxième étape sont remplis en fonction des commandes d'un magasin. Il est donc rarement chargé au maximum. Le département transport de Delhaize considère un taux de remplissage moyen de 80%, soit **64 « dolly »**, ce qui représente 28672 unités de vente.

Les données concernant le type de camion utilisé et la consommation horaire de carburant pour la réfrigération sont identiques pour cette deuxième étape. Ce sont donc **6,25 litres** de diesel qui sont nécessaires au maintien d'une température de 4°C pendant 1h15 de trajet.

[40] Calculée sur une base de 75% de la distance parcourue sur autoroute à 90km/h et 25% de la distance hors autoroute parcourue à une vitesse moyenne de 35 km/h.

Les résultats de l'inventaire seront ramenés à l'UF et présentés dans le tableau comparatif des deux alternatives (cfr. infra).

6.2.4.3. Alternative 2 : purée surgelée

L'on distingue les deux mêmes étapes de transport pour les articles de purée surgelée. Le type de camion utilisé (28 tonnes, norme EURO5) est identique à la première alternative.

Première étape

La distance entre le site de production de la purée et le DC est de 137 km, ce qui équivaut à une durée de trajet de 2 heures (en camion). Les unités de vente sont groupées par 12 dans une boite en carton (emballage secondaire), à raison de 72 boites par palette et de 33 palettes par camion, ce qui permet donc le transport de 28512 unités de vente (= 12·72·33) par camion.

A nouveau, déplacement et réfrigération sont effectués par des moteurs distincts. L'équipement maintenant la température de surgélation consomme 8 litres[41] de diesel par heure de trajet soit **16 litres** pour les deux heures de cette première étape.

Toutes ces données seront utilisées dans les calculs d'inventaire dont les résultats ramenés à une unité fonctionnelle sont disponibles dans le tableau comparatif (cfr. infra).

Seconde étape

Les hypothèses posées pour la première alternative, à savoir une distance moyenne de 80 km pour un trajet d'1h15, peuvent être conservées pour ce deuxième trajet entre DC et supermarché. Ceci nous permet de calculer une consommation de **10 litres** de diesel pour la réfrigération.

Les données logistiques sont identiques à celles de la première étape (12 unités par boite en carton, 72 boites par palette, 33 palettes par camion).

Le tableau suivant compare les deux alternatives, pour les deux étapes de transport confondues, sur base de quelques substances émises dans les différents milieux récepteurs. Les résultats sont ramenés à l'UF par l'intermédiaire du flux de référence.

[41] A nouveau, la consommation réelle dépend fortement de la température extérieure. Le chiffre de 8 litres est une valeur moyenne annuelle fournie par Delhaize.

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
CO_2	4,57E-03	5,48E-03
CH_4	4,06E-06	4,58E-06
$PM_{2,5}$	2,79E-06	4,50E-06
CO	1,05E-05	1,73E-05
COVNM	3,48E-06	4,71E-06
NO_x	3,13E-05	4,55E-05
HCl	1,09E-08	1,34E-08
Pb	7,01E-10	7,72E-10
SO_2	5,16E-06	6,82E-06
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
Fe	8,51E-08	1,03E-07
Pb	3,28E-10	3,37E-10
Cl^-	1,79E-07	2,11E-07
Zn	2,30E-08	2,37E-08
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
NH_4^+	6,68E-09	8,11E-09
DBO_5	1,44E-05	1,82E-05
DCO	1,47E-05	1,85E-05
Hg	3,14E-11	3,85E-11
Phosphates	3,41E-07	4,20E-07
Sulfates	8,57E-06	1,06E-05
Nitrates	1,05E-07	1,29E-07
COT	4,53E-06	5,69E-06

Tableau 15. Inventaire des émissions et extractions du transport réfrigéré

On peut observer des valeurs plus élevées pour la seconde alternative, et ce pour toutes les substances répertoriées dans ce tableau. Ceci est le fait de la réfrigération à -18°C, synonyme d'une consommation de carburant non négligeable. Ainsi, pour une unité fonctionnelle, l'on constate

quelques 4,57 grammes de CO_2 émis pour la purée fraîche contre 5,48 pour la purée surgelée, soit 20% de plus pour la seconde alternative. On remarque également une différence plus marquée concernant les particules en suspension de diamètre inférieur à 2,5 micromètres (PM – « Particulate Matter »), pour lesquelles la purée surgelée présente un résultat 61% supérieur à celui de la purée fraîche. Enfin, l'on observe des valeurs de DBO et de DCO très proches.

Enfin, on peut affirmer que les données issues d'Ecoinvent (2010) sont de bonne qualité et présentent peu d'incertitude. Le facteur d'émissions et d'extraction du transport en camion est valable pour l'Europe occidentale, tandis que la combustion du diesel pour la réfrigération se base sur un modèle de générateur électrique valable pour le monde entier. Tous deux incluent les émissions résultant de la combustion de diesel ainsi que l'extraction de pétrole brut nécessaire à la fabrication du carburant.

6.2.5. Procédés de stockage réfrigéré

6.2.5.1. Problème d'affectation

Pour des raisons de concision, les trois étapes de stockage réfrigéré seront présentées sous une seule et même rubrique. Pour les deux alternatives, on distingue donc le stockage au **centre de distribution**, le stockage au **supermarché** et le stockage chez le **consommateur** (cfr. figure 11). Il s'agit de procédés assez simples qui ne présentent que deux types de flux intermédiaires entrants : les unités de vente à réfrigérer et l'électricité, et un seul type de flux intermédiaires sortants : les mêmes unités de vente. On ne recense donc aucun échange **direct** de flux élémentaires avec l'environnement (entrants ou sortants).

Toutefois, nous sommes ici confrontés à un problème d'allocation puisque les produits alimentaires sortants et entrants ne sont pas tous des unités de purée fraîche. De nombreux articles distincts entrent et sortent du procédé à des instants différents. La difficulté est donc d'allouer la juste consommation d'énergie électrique au couple purée-emballage.

Il nous faut donc choisir une méthode de résolution pour ce problème d'affectation en tentant de respecter la hiérarchie prévue par la SETAC et l'ISO. Premièrement, éviter l'allocation semble impossible car on ne peut ni subdiviser les procédés ni étendre le système. La seconde possibilité est dès lors l'allocation physique. La méthode des variations marginales est théoriquement concevable bien qu'il paraisse malaisé de déceler la variation d'électricité par ajout ou par retrait d'une unité de vente de chaque famille d'article que contient le réfrigérateur pour ensuite être capable d'affecter l'hypothétique variation de consommation énergétique à l'une ou l'autre famille d'article.

Par contre, la **méthode de causalité physique** nous paraît être applicable. Le paramètre physique retenu est le **volume**, car il est facilement mesurable et permet d'être relativement précis, même s'il ne reflète qu'une réalité causale approximative. On reportera donc la consommation d'énergie électrique

au volume occupé par l'unité de vente dans le réfrigérateur ou surgélateur, et ce par unité de temps. Pour pouvoir calculer la part à allouer au couple produit-emballage, il nous faut connaître le volume de contenance et la consommation électrique nette des installations de réfrigération, le volume occupé par l'article étudié ainsi que le temps de séjour dans chaque stock réfrigéré.

En ce qui concerne le temps de séjour dans les différentes installations de réfrigération, la **durée de vie du produit est un facteur prépondérant** qu'il faut donc absolument connaître, car il influence considérablement le temps de séjour chez le consommateur. Cela est particulièrement vrai pour les aliments surgelés qui peuvent être conservés plusieurs mois.

Par ailleurs, le temps de séjour chez le consommateur est également fonction du comportement du client. Delhaize ne dispose d'aucune donnée concernant le temps moyen de séjour chez le consommateur et dans les supermarchés[42]. On calculera ceux-ci en fonction de la durée de vie du produit, du temps de séjour dans l'installation de réfrigération du centre de distribution et de l'**hypothès**e d'une **consommation du produit** (purée) **à 50% de la durée de vie** (50% de la Date Limite de Consommation – DLC).

Le **taux de remplissage** des réfrigérateurs et surgélateurs a également une incidence sur l'allocation puisque, pour une consommation électrique moyenne donnée, la part à affecter par article sera logiquement plus élevée si le nombre d'articles est plus faible.

Enfin, il est à noter que nous ne considérerons que l'énergie consommée pour la réfrigération des produits. L'électricité nécessaire à l'éclairage de l'appareil ne sera pas retenue dans les calculs.

6.2.5.2. Alternative 1 : purée fraîche

Durée de vie et temps de séjour

La durée de vie de la purée de pommes de terre fraîche entre sa sortie d'usine et la date limite de consommation (DLC) est de **28 jours** (données du fournisseur). A partir du temps de séjour moyen dans le centre de distribution, nous déduisons les informations suivantes :

- Temps de séjour au DC : 4 jours (donnée Delhaize)
- Temps de séjour magasin : 5 jours (**hypothèse**)
- Temps de séjour chez le consommateur : 5 jours (**hypothèse**)

Le total des temps de séjour est donc de 14 jours, en accord avec l'hypothèse d'une consommation à 50% de la DLC.

[42] Le succès d'un produit étant très variable d'un supermarché à l'autre, aucun temps de séjour moyen en magasin n'a été estimé par Delhaize.

Stockage au centre de distribution

Ne disposant d'aucune information concernant les installations de réfrigération du centre de distribution, nous considérerons que l'énergie électrique consommée par unité de vente et par jour pour la réfrigération au DC est identique à celle du stockage en supermarché (cfr. infra). La consommation d'électricité sera donc calculée à partir des résultats de l'étape suivante. Les appareils utilisés au DC étant certainement conçus pour la réfrigération d'importants volumes de marchandises, il est très probable que la consommation d'énergie affectable à une unité de vente soit en réalité plus faible. En procédant de la sorte, nous pensons ne pas sous-évaluer les impacts environnementaux correspondant à la présente étape.

Stockage au supermarché

Il existe de nombreux modèles de réfrigérateur dans les supermarchés Delhaize, différant notamment par leurs dimensions (longueur, largeur, profondeur) et leurs accessoires (avec ou sans porte). Nous choisirons donc un modèle de dimensions intermédiaires et nous nous placerons dans l'optique de la *meilleure technique disponible* (MTD) et retiendrons donc le **modèle avec portes**[43] pour notre analyse.

La fiche technique de l'appareil nous fournit les données suivantes :

- Volume net = 25 · 7,85 · 16 = 3140 dm³
- Puissance[44] de réfrigération : 1045 W

Nous pouvons dès lors calculer la consommation d'énergie imputable à une unité de vente en fonction du rendement électrique de l'appareil, du volume utile (via le taux de remplissage) de celui-ci et du volume occupé par l'article de purée fraîche. Nous posons donc l'hypothèse d'un **taux de remplissage moyen de 75%** et d'un **rendement (ŋ) de 70%**[45], ce qui nous donne les résultats suivants :

- Volume utile = 3140 · 0,75 = 2355 dm³
- Volume d'une unité de vente = 1,85 · 1,35 · 0,4 = 1 dm³
- Puissance consommée :

$$Puissance\ consommée = \frac{Puissance\ nominale}{\eta} = \frac{1045}{0,7} = 1493\ W$$

- Energie consommée par l'appareil par jour (t = 24h) :

$$Energie = P \cdot t = 1,493\ .24 = 35,8\ kWh$$

- Energie consommée affectable à une unité de vente (par jour) = $\frac{35,8}{2355}$ = 0,0152 kWh = 15,2 Wh
- Energie consommée par **unité fonctionnelle** pour **5 jours en magasin** = 15,2 · 5 = **76 Wh**

[43] Soit le modèle Gazelle L20 250 de la marque Costan.
[44] Calculée sur base du bilan thermique moyen incluant les périodes d'ouverture et de fermeture du réfrigérateur
[45] Rendement électrique suggéré par le responsable technique de la réfrigération chez Delhaize.

Sur base de ces résultats, nous pouvons calculer l'énergie électrique consommée pour les **4 jours** de stockage au **centre de distribution**, pour **une unité fonctionnelle** : 15,2 · 4 = **60,8 Wh**

Stockage chez le consommateur

Il existe de très nombreux modèles de réfrigérateurs différant par la taille (volume), la puissance, la classe énergétique, les accessoires (une ou deux portes), etc. Certains appareils sont par ailleurs des combinés réfrigérateur-surgélateur. Nous choisirons donc un modèle de dimensions intermédiaires tout en nous plaçant dans l'optique de la *meilleure technique disponible*. A ce jour, la MTD correspond à la classe énergétique « A++ ». Pour la phase de calcul, nous avons donc retenu un réfrigérateur[46] (sans combiné de surgélation) à une porte, d'efficacité énergétique « A++ », dont la fiche technique nous fournit les informations suivantes :

- Consommation nette d'électricité : 103 kWh/an (données du catalogue)
- Volume net : 355 dm³

La consommation d'énergie électrique est nette, elle inclut donc le rendement. En reprenant le taux de remplissage moyen de 75%, le volume d'une unité de vente de 1 dm³ et le temps de séjour de 5 jours chez le consommateur, nous pouvons calculer ce qui suit :

- Volume utile = 355 · 0,75 = 266,25 dm³
- Consommation nette journalière d'électricité = $\frac{103}{365}$ = 0,2822 kWh/jour = 282,2 Wh/jour
- Consommation nette journalière affectable à une unité de vente = $\frac{282,2}{266,25}$ = 1,06 Wh/jour
- Energie consommée par **UF** pour **5 jours** dans le réfrigérateur = 1,06 · 5 = **5,3 Wh**

6.2.5.3. Alternative 2 : purée surgelée

Durée de vie et temps de séjour

La durée de vie de la purée de pommes de terre surgelée entre sa sortie d'usine et la date limite de consommation (DLC) est de **24 mois** (données du fournisseur). A partir du temps de séjour moyen dans le centre de distribution, nous déduisons les informations suivantes :

- Temps de séjour au DC : 4 jours (donnée Delhaize)
- Temps de séjour magasin : 10 jours (**hypothèse**)
- Temps de séjour chez le consommateur : 351 jours (**hypothèse**)

Le total des temps de séjour est donc de 365 jours, soit 12 mois, en accord avec l'hypothèse d'une consommation à 50% de la DLC.

[46] Réfrigérateur de marque Bosch, modèle KSR 38X31, catalogue 2009-2010.

Stockage au centre de distribution

Pour les mêmes raisons que celles évoquées plus haut (cfr. supra), la consommation d'énergie électrique imputable à une unité de vente, et a fortiori à une unité fonctionnelle, sera déduite à partir des résultats de l'étape de stockage au supermarché.

Stockage au supermarché

Le principal modèle de surgélateur utilisé dans les supermarchés Delhaize se présente sous la forme d'un appareil à deux niveaux : l'un vertical et l'autre horizontal, tous deux fermés par des portes. Les articles de purée surgelée sont placés dans la partie verticale de l'installation. Il convient donc d'étudier la consommation d'électricité de celle-ci. Dans ce cas, cela ne pose pas de problème d'allocation car les deux compartiments sont alimentés par des moteurs indépendants ; on peut donc effectuer une **subdivision des procédés**. La fiche technique de l'appareil nous fournit les informations suivantes :

- Volume net = 8,05 · 4 · 25 = 805 dm³
- Consommation nette d'électricité : 17,025 kWh/jour

Sachant qu'une unité de vente de purée surgelée présente un volume de **1,9 dm³** et que l'on considère toujours un taux de remplissage moyen du surgélateur de 75%, nous pouvons calculer les éléments suivants :

- Volume utile = 805 · 0,75 = 603,75 dm³
- Consommation nette journalière d'électricité par unité de volume utile = $\frac{17,025}{603,75}$ = 0,0282 kWh/dm³
- Consommation nette journalière d'électricité par unité de vente = 0,0282 · 1,9 = 0,0536 kWh
- Consommation nette journalière d'électricité **par unité fonctionnelle pour les 10 jours en supermarché** = 0,0536 · 0,6 · 10 = 0,321 kWh = **321 Wh**

Nous pouvons dès lors calculer la consommation d'électricité relative aux **4 jours** de stockage au **centre de distribution**, pour une **UF** : 0,0536 · 0,6 · **4** = 0,129 kWh = **129 Wh**

Stockage chez le consommateur

A nouveau, il existe de très nombreux modèles de surgélateurs qui diffèrent par la taille (volume), la puissance, la classe énergétique, etc. Par ailleurs, certains surgélateurs sont verticaux (modèle « armoire ») tandis que d'autres sont horizontaux (modèle « coffre »). Nous choisirons donc un modèle de dimensions intermédiaires tout en nous plaçant dans l'optique de la *meilleure technique disponible*, soit la classe énergétique « A++ ». Pour cet inventaire de cycle de vie, nous avons donc

retenu un surgélateur[47] horizontal d'efficacité énergétique « A++ », dont la fiche technique nous fournit les informations suivantes :

- Volume net : 287 dm³
- Consommation électrique nette : 190 kWh/an (données du catalogue)

En considérant le taux de remplissage moyen de 75%, le volume d'une unité de vente de 1,9 dm³ et le temps de séjour de 351 jours chez le consommateur, nous pouvons déduire les résultats suivants :

- Volume utile : 287 · 0,75 = 215,25 dm³
- Consommation nette journalière d'électricité = $\frac{190}{365}$ = 0,52 kWh/jour = 520 Wh/jour
- Consommation nette journalière d'électricité par unité de volume utile = $\frac{520}{215,25}$ = 2,42 Wh/jour
- Consommation nette journalière d'électricité **par unité fonctionnelle pour les 351 jours** dans le surgélateur = 2,42 · 1,9 · 0,6 · 351 = 966 Wh = **0,967 kWh**

6.2.5.4. Comparaison des alternatives

En sommant les différents résultats obtenus à chaque étape, nous pouvons comparer les deux alternatives pour l'ensemble des procédés de stockage réfrigéré. Le tableau suivant regroupe les données de consommation électrique par unité fonctionnelle :

	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
Centre de distribution	60,8 Wh	129 Wh
Supermarché	76 Wh	321 Wh
Consommateur	5,3 Wh	967 Wh
Total procédé de stockage réfrigéré	142,1 Wh = 0,142 kWh	1417 Wh = 1,417 kWh

Tableau 16. Procédés de stockage réfrigéré : consommation d'énergie électrique

On observe une valeur nettement plus élevée pour la seconde alternative, ce qui est en partie le fait du long temps de séjour chez le consommateur attribué à celle-ci, conséquence de l'hypothèse d'une utilisation du produit (purée) à 50% de la DLC. La consommation annuelle nette d'un surgélateur, sensiblement supérieure à celle d'un réfrigérateur, est également un facteur d'influence important.

Pour des raisons de concision, nous ne dresserons pas de tableau d'inventaire des émissions. Celles-ci seront calculées sur base du **profil énergétique belge**, puisque l'ensemble des procédés a lieu sur le territoire national, et seront évidemment incluses dans le total des émissions de chaque alternative.

[47] Surgélateur de marque Bosch, modèle GTM 30A30, catalogue 2009-2010

6.2.6. Procédés d'utilisation

Le seul flux intermédiaire entrant de ce procédé unitaire est l'énergie électrique (hors purée). La phase d'utilisation est rendue possible par un appareil électrique permettant de chauffer la purée. Pour la phase d'utilisation, les calculs d'inventaire seront basés sur le **profil énergétique belge**, ce qui nous parait logique puisque cette phase ne concerne que des clients de Delhaize résidant en Belgique.

6.2.6.1. Alternative 1 : purée fraîche

Selon les instructions d'utilisation lisibles sur l'emballage, la purée fraîche doit être réchauffée au four à micro-ondes, pendant 3 minutes à une puissance de 1000 watts. Cette puissance est une puissance nominale ou commerciale. La première étape est donc de calculer la puissance réellement consommée. Pour cela, nous devons connaître le rendement d'un four à micro-ondes. Des tests basés sur la mesure de l'élévation de température d'un litre d'eau et le calcul de l'énergie reçue par l'eau par rapport à l'énergie électrique consommée[48] par le four ont prouvé que le rendement de ce dernier dépasse rarement les 50%. Un exemple d'un tel test est disponible en annexe. Nous considérerons donc un **rendement de 50%** pour le four à micro-ondes.

Nous pouvons donc calculer la puissance consommée. La formule de calcul du rendement (ŋ) étant la suivante :

$$\eta = \frac{Puissance\ nominale}{Puissance\ consommée}$$

La puissance consommée s'obtient comme suit :

$$Puissance\ consommée = \frac{Puissance\ nominale}{\eta} = \frac{1000}{0{,}5} = 2000\ W$$

La consommation d'énergie électrique, quant à elle, s'obtient en multipliant la puissance consommée par le temps d'utilisation (3 minutes ou 180 secondes) :

$$Energie = P \cdot t = 2000 \cdot 180 = 360000\ W.s = \mathbf{0{,}1\ kWh}$$

Le réchauffage de la purée fraîche consomme donc 0,1 kilowatt·heure électrique par UF.

Ce chiffre devra être multiplié par le facteur d'émissions de la production d'électricité.

[48] Le rendement est donné par le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie utile, calculée grâce à la formule E = Cp·ΔT°·masse ; le Cp (chaleur massique) de l'eau étant de 4,18.

6.2.6.2. Alternative 2 : purée surgelée

Selon les instructions d'utilisation, la purée surgelée doit être réchauffée à la casserole, à feu doux pendant 6 minutes. Le réchauffage peut se faire avec une table de cuisson à gaz ou électrique. Nous choisirons la solution électrique.

Plusieurs technologies de plaques électriques existent : les plaques émaillées, les plaques vitrocéramiques à rayonnement, les plaques vitrocéramiques halogènes et les plaques à induction. Ne disposant pas de chiffres renseignant sur la technologie la plus utilisée par les ménages belges, nous choisirons donc la *meilleure technique disponible* (MTD), c'est-à-dire celle qui présente le meilleur rendement électrique. Ainsi, il apparait que les plaques à induction sont la technologie la plus avancée, offrant un rendement oscillant autour des 90%. Nous choisirons donc cette option et ce rendement pour nos calculs.

Considérons un modèle standard[49] de table de cuisson à quatre plaques parmi lesquelles nous choisissons la taille, et donc la puissance, intermédiaire, soit 1800 watts. Puisque la purée doit être réchauffée à feu doux, nous poserons l'hypothèse de la plaque utilisée au **quart de sa puissance**, soit 450 watts. Le rendement étant de 90%, nous calculons la puissance réellement consommée, qui est de **500 watts** (cfr. formule supra). Nous pouvons dès lors connaître l'énergie électrique consommée, sachant la durée de réchauffage de 6 minutes (360 secondes) par unité de vente, soit 216 secondes par unité fonctionnelle :

$$Energie = P \cdot t = 500 \cdot 216 = 108000\ W.s = \mathbf{0,03\ kWh}$$

Le réchauffage de la purée surgelée consomme donc 0,03 kilowatt·heure électrique.

L'inventaire des émissions et extractions des procédés d'utilisation ne sera pas repris sous forme de tableau par mesure de concision. Il sera cependant pris en compte dans le total des émissions et extractions de chaque alternative.

[49] Nous avons utilisé pour cet exemple les caractéristiques techniques d'une plaque de cuisson de marque Bosch (modèle PIE 775N14 E), issues du catalogue 2009-2010 de la marque.

6.2.7. Procédés de traitement de fin de vie

6.2.7.1. Remarques préliminaires

Cette ultime étape du cycle de vie est celle du traitement des déchets que sont devenus les emballages primaires et secondaires après la phase d'utilisation du produit. Pour cette dernière partie de l'ICV, nous nous baserons sur les règles belges en matière de gestion des déchets, dans le sens du devenir d'un déchet en fonction de sa composition. Ainsi, par exemple, les emballages ménagers en polypropylène ne sont pas recyclés en Belgique mais incinérés. Nous tenterons dès lors de nous approcher au mieux de la réalité des faits.

Une remarque importante doit être formulée avant les calculs d'inventaire : dans la base de données Ecoinvent, les facteurs d'émissions et d'extraction relatifs aux procédés d'incinération des ordures ménagères sont basés sur le modèle technologique suisse et n'ont donc été validés que pour ce pays. Cependant, les auteurs de la base de données considèrent celles-ci comme étant applicables aux installations modernes de l'Union européenne.

Pour nous en assurer, nous avons analysé les législations suisse et européenne en matière d'incinération de déchets ménagers. Le tableau suivant compare les **valeurs limites d'émission par substance,** pour les incinérateurs, en **moyenne journalière** (liste non exhaustive) :

Type de substance émise	Normes de l'Union européenne[50]	Normes suisses[51]
Poussières totales	10mg/m³	10 mg/m³
Oxydes d'azote (NO_x)	200mg/m³	80 mg/m³
Monoxyde de carbone (CO)	50 mg/m³	50 mg/m³
Substances organiques à l'état de gaz ou de vapeur, exprimées en carbone organique total	10 mg/m³	20 mg/m³
Chlorure d'hydrogène (HCl)	10 mg/m³	20 mg/m³
Fluorure d'hydrogène (HF)	1 mg/m³	2 mg/m³
Mercure (Hg)	0,05 mg/m³	0,1 mg/m³
Cadmium (Cd)	0,05 mg/m³	0,1 mg/m³
Dioxines et furannes	0,1 ng/m³	0,1 ng/m³

Tableau 17. Comparaison des législations européenne et suisse : valeurs limites d'émission pour les installations d'incinération de déchets non dangereux

Malgré quelques différences plus ou moins sensibles, nous constatons de nettes similitudes entre les deux législations, ce qui laisse à penser que les deux entités utilisent des techniques équivalentes pour satisfaire les normes, notamment en matière de traitement des fumées. Nous estimons donc que les données d'émissions pour l'incinération, issues d'Ecoinvent, peuvent être utilisées sans porter atteinte à la véracité des résultats.

[50] Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000 relative à l'incinération des déchets, annexes IV et V

[51] Ordonnance du Conseil fédéral suisse sur la protection de l'air (814.318.142.1) du 16 décembre 1985, mise à jour par la Modification du 4 juillet 2007

6.2.7.2. Alternative 1 : purée fraîche

Comme expliqué dans la théorie de l'analyse de cycle de vie, le traitement des déchets, qu'il consiste en une élimination ou un recyclage, génère très souvent des problèmes d'affectation (cfr. 5.3.3. Coproduits et problèmes d'affectation). Les différents composants d'emballage de la purée fraîche n'échappent pas à la règle. Pour chacun d'entre eux, il convient donc de cibler le problème et de choisir la méthode de résolution la plus appropriée, en tentant de respecter la hiérarchie mise en place par la SETAC et l'ISO (cfr. 5.3.4. Résolution des problèmes d'affectation).

La barquette

La barquette en polypropylène (emballage primaire) n'est pas recyclée en Belgique. Elle est donc destinée à l'incinération des ordures ménagères (IOM). Le problème d'affectation est ici celui du **cotraitement**, puisque l'incinérateur élimine toutes sortes d'objets et de matières **simultanément**. Cependant, la base de données dispose d'un facteur d'émissions et d'extraction pour l'incinération[52] du polypropylène, que nous utiliserons donc pour les calculs d'inventaire. Ceci revient en fait à éviter l'allocation par **subdivision des procédés** (première méthode de résolution dans la hiérarchie).

La masse de la barquette (17,4 grammes par unité fonctionnelle) sera donc multipliée par le facteur d'émissions de l'incinération du PP.

Le film

Le film, composé de LDPE et de nylon 6-6 selon les hypothèses posées, est également non recyclable et donc destiné à l'IOM. Le problème d'affectation est donc strictement identique à celui de la barquette. La base de données ne dispose pas de facteur d'émissions pour l'incinération des deux polymères concernés. Par contre, elle propose un facteur pour l'incinération d'un **mélange moyen de thermoplastiques**. En utilisant ce dernier, nous effectuons à nouveau un évitement de l'allocation par **subdivision des procédés**. Nous pensons être plus proches de la réalité en procédant de la sorte, plutôt que d'essayer de résoudre le problème d'affectation à partir d'un autre facteur d'émissions moins ciblé, basé par exemple sur un mélange moyen d'ordures ménagères. Qui plus est, nous respectons la hiérarchie des méthodes en recourant à la première d'entre elles.

Pour les calculs d'inventaire, nous multiplierons la masse du film (1,3 grammes par UF) par le facteur d'émissions retenu.

L'étui

L'étui en carton est, quant à lui, valorisable par la filière classique de recyclage des papiers et carton. Le déchet redevient donc un produit à valeur économique certaine. Le problème vient de la difficulté de placer la limite entre les procédés (et donc les charges environnementales) imputables au produit et ceux attribuables au déchet. En effet, le produit nouvellement constitué devient potentiellement un

[52] Toutes les étapes d'incinération sont considérées sans valorisation énergétique.

produit intermédiaire ou un produit fini pour un autre procédé, qui **sort du système analysé**, ne faisant pas partie du cycle de vie analysé.

Dans le chapitre consacré à la production de la boite en carton d'emballage secondaire de la purée surgelée, nous avons pris en compte dans l'inventaire le facteur d'émissions du « wellenstof », papier issu d'une filière de recyclage, incluant tous les procédés nécessaires à la **fabrication** de celui-ci depuis l'acquisition des matières premières.

Or, le traitement par recyclage des déchets de papier et de carton peut être divisé en deux étapes distinctes :

- le tri[53] des déchets afin de séparer les matières indésirables ou non recyclables de ce qui est apte au recyclage, aussi appelé prétraitement ;
- le traitement (physico-chimique) proprement dit comprenant pulpage, épuration et raffinage, résultant en la fabrication d'un nouveau produit à valeur marchande.

Suivant le raisonnement développé plus haut, le tri serait donc imputable aux déchets, tandis que le traitement physico-chimique serait affectable au papier recyclé (le « wellenstof » dans l'exemple de la boite en carton), ce qui revient à subdiviser le procédé. La méthode utilisée pour résoudre le problème d'affectation sera donc celle de l'**évitement de l'allocation par subdivision des procédés**.

La base de données disposant d'un facteur d'émissions pour le tri (prétraitement) des déchets de papier, nous pouvons donc affecter de manière exacte les charges environnementales correspondant à la fin de vie de l'étui en carton. Dans les calculs d'inventaire, la masse de ce dernier, à savoir 20,95 grammes sera donc multipliée par le facteur d'émissions du tri.

Le cageot d'emballage secondaire

Lorsqu'il arrive en fin de vie, le cageot en polypropylène est traité par le fabricant qui peut recycler une partie de la matière. Cependant, un cageot ne peut pas être constitué uniquement de polypropylène recyclé car la qualité de ce dernier n'est pas suffisante pour satisfaire les exigences de solidité du cageot. Nous ne connaissons pas la part de PP recyclé par cageot en fin de vie. Nous poserons l'hypothèse d'un taux de recyclage de la matière de **50% en poids**, le reste étant destiné à l'incinération.

A nouveau, nous résoudrons le problème d'affectation par la **subdivision des procédés**, considérant que le recyclage[54] des premiers 50% est imputable à la fabrication des nouveaux cageots tandis que l'élimination par incinération, et donc les impacts environnementaux correspondants, sont attribuables au couple purée-emballage. La **moitié** de la masse de PP « consommée » par unité fonctionnelle, soit

[53] Il s'agit bien du tri réalisé sur le site de traitement des déchets, et non du premier tri sélectif réalisé par le particulier.

[54] Le recyclage du polypropylène consiste principalement en un broyage de la matière, qui peut alors être directement mise en forme par injection-moulage.

4,08 grammes de matière, sera soumise au facteur d'émission de l'incinération du polypropylène dans les calculs d'inventaire.

6.2.7.3. Alternative 2 : purée surgelée

La poche

En fin de vie, la poche en LDPE est elle aussi destinée à l'incinération. Le problème de cotraitement sera à nouveau résolu par **subdivision des procédés** grâce à l'utilisation du facteur d'émissions de l'incinération d'un mélange moyen de plastique, auquel sera soumis la masse de la poche ramenée à une unité fonctionnelle, soit 3 grammes.

La boite en carton

La boite en carton ondulé, valorisable par une filière de recyclage des déchets de carton, est caractérisée par le même problème d'affectation que l'étui de suremballage de la purée fraîche. En effet, après traitement, il redevient un produit ayant une valeur économique. On effectuera, selon la même logique que pour l'étui, un évitement de l'allocation par une **subdivision des procédés**, attribuant les charges environnementales du prétraitement (tri) aux déchets et celles du traitement physico-chimique au produit nouvellement constitué.

A nouveau, nous utiliserons le facteur d'émissions correspondant au tri des déchets de carton, que nous appliquerons à la masse de carton ondulé formant la boite, ramenée à une UF, soit 21,69 grammes.

Nous pouvons maintenant établir l'inventaire des émissions et extractions de l'ensemble des procédés de traitement de fin de vie, et ce pour chaque alternative.

Il est à noter que les problèmes d'affectation engendrés par les **procédés de recyclage** auraient également pu être résolus par la méthode d'évitement de l'allocation par **extension du système**.

6.2.7.4. Comparaison des deux alternatives

Sur base de leur inventaire d'émissions respectif, les deux alternatives peuvent être comparées. Le tableau suivant permet la comparaison sur base de quelques substances, classées en fonction du milieu récepteur.

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
CO_2	6,04E-02	1,01E-02
CH_4	3,61E-06	3,15E-06
$PM_{2,5}$	1,09E-06	9,51E-07
CO	1,23E-05	7,51E-06
COVNM	5,28E-06	4,06E-06
NO_x	2,27E-05	1,60E-05
HCl	6,66E-08	6,59E-08
Pb	1,39E-09	1,32E-09
SO_2	3,37E-06	3,23E-06
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
Fe	3,15E-07	3,20E-07
Pb	6,15E-11	6,20E-11
Cl^-	2,49E-06	2,54E-06
Zn	4,27E-09	4,30E-09
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
NH_4^+	6,87E-09	6,79E-09
DBO_5	1,35E-04	2,28E-05
DCO	4,01E-04	5,92E-05
Hg	2,73E-10	2,96E-10
Phosphates	1,57E-06	1,51E-06
Sulfates	7,32E-05	5,35E-05
Nitrates	2,12E-06	1,48E-06
COT	1,58E-04	2,30E-05

Tableau 18. Inventaire des émissions : procédés de traitement de fin de vie

On constate notamment l'émission de quelques 60 grammes de dioxyde de carbone (CO_2) pour la première alternative, valeur six fois supérieure à celle de la seconde alternative. La Demande Chimique en Oxygène est également nettement plus élevée pour le couple purée fraîche-emballage.

Pour d'autres substances, les différences sont moins marquées. Ainsi, la valeur du plomb (Pb) émis dans le sol ne diffère que d'un pourcent entre les deux scénarios, de même que celle du dioxyde de soufre (SO_2) dans l'air qui est de 4% supérieure pour la purée fraîche par rapport à la purée surgelée.

En ce qui concerne la qualité des données, il a déjà été signalé que le facteur d'émissions de l'incinération est basé sur le modèle suisse. Il inclut le procédé d'incinération ainsi que le traitement des résidus d'incinération. Le facteur du prétraitement (tri) des papiers et cartons comprend toutes les matières et énergies nécessaires au procédé, le traitement des déchets générés par le tri ainsi que le transport jusqu'au site de traitement physico-chimique du papier. Ces données sont issues de la version 2010 d'Ecoinvent.

6.2.8. Résultats finaux d'inventaire

L'étape d'inventaire a permis de donner une valeur chiffrée aux quantités de matières et d'énergie consommées (flux élémentaires entrants) et aux émissions dans l'air, l'eau et le sol (flux élémentaires sortants) pour l'ensemble des procédés constitutifs du système. Toutes les étapes du cycle de vie des couples purée-emballage ont en effet été analysées (hors étapes communes). Nous pouvons dès lors additionner les résultats intermédiaires de chaque substance afin d'obtenir l'**inventaire final des émissions et des extractions**, première agrégation des données.

Grâce à celui-ci et **sous réserve des hypothèses** posées tout au long de l'analyse, nous pouvons constater les différences d'émissions entre chaque alternative (par unité fonctionnelle), sans toutefois tirer de conclusion précoce.

Le tableau suivant reprend les résultats finaux de chaque alternative pour quelques substances, classées en fonction des trois milieux récepteurs :

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
CO_2	2,692E-01	5,604E-01
CH_4	5,862E-04	6,081E-04
$PM_{2,5}$	4,045E-05	1,504E-04
CO	2,783E-04	7,115E-04
COVNM	1,491E-04	1,361E-04
NO_x	4,259E-04	9,995E-04
HCl	7,130E-06	1,828E-05
Pb	1,332E-07	7,245E-07
SO_2	4,587E-04	1,170E-03
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
Fe	1,922E-06	2,701E-04
Pb	1,463E-09	3,357E-07
Cl^-	1,105E-05	6,211E-06
Zn	7,619E-08	1,385E-07
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]		
	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
NH_4^+	4,124E-06	3,888E-06
Chrome VI	8,606E-07	2,249E-06
DCO	7,855E-04	5,540E-04
Hg	2,025E-08	9,125E-08
Phosphates	2,118E-04	6,874E-04
Sulfates	5,408E-03	1,753E-02
Nitrates	1,147E-04	2,547E-04

Tableau 19. Inventaire final des émissions : comparaison des alternatives

Force est de constater que l'alternative de la purée surgelée présente des valeurs supérieures pour la totalité des émissions présentées dans ce tableau, excepté pour les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), l'ion ammonium (NH_4^+) et le demande chimique en oxygène (DCO). Nous ne tirerons cependant aucune conclusion avant l'analyse de l'impact environnemental (cfr. infra).

6.3. Analyse de l'impact environnemental

Troisième phase de l'ACV, l'analyse de l'impact environnemental a pour but de relier les données d'inventaire à leur impact sur le milieu naturel.

Les résultats de l'inventaire ne permettent pas de déterminer quelle alternative est préférable d'un point de vue environnemental. En effet, même si la purée fraîche montre des valeurs d'émissions inférieures pour la plupart des substances, il n'est pas certain pour autant qu'elle présente l'impact environnemental le plus faible, bien que cela soit très probable.

Par ailleurs, le nombre de substances (1275) est bien trop conséquent pour tenter une comparaison immédiate sur base de celles-ci. De plus, l'ordre de grandeur de la différence entre chaque substance comparativement peut être plus ou moins significatif en termes de dommages environnementaux et doit donc être étudié plus précisément.

Il convient donc d'agréger et de classer ces données en fonction de leurs potentiels d'impact, et ce afin de les rendre plus éloquentes. Comme spécifié dans le chapitre théorique de l'analyse de l'impact environnemental (cfr. 5.4. Analyse de l'impact environnemental), nous utiliserons la méthode Impact 2002+ pour l'agrégation et la classification des résultats d'inventaire.

Le nombre de substances fournies par la base de données étant particulièrement important, il nous est impossible d'encoder les équivalences (facteurs[55] de caractérisation intermédiaire) et de calculer les scores de caractérisation pour chaque élément. Nous réaliserons donc l'analyse de l'impact sur base de **45 substances**, choisies parmi les différents milieux récepteurs. La liste des substances retenues, les résultats d'inventaire pour chacune d'entre elles, ainsi que les facteurs de caractérisation intermédiaires correspondant sont disponibles en annexe.

Par ailleurs, pour la réalisation de la **caractérisation intermédiaire**, nous considérerons uniquement les substances **émises** dans l'air, l'eau et le sol ; les extractions de ressources (extraction de minerais, occupation des sols, etc.) ne seront pas prises en compte. Rappelons qu'une substance peut avoir des impacts multiples et donc être reprise dans plusieurs catégories intermédiaires.

Sur base des substances sélectionnées et des précisions apportées ci-dessus, la caractérisation intermédiaire des résultats d'inventaire nous donne, pour les catégories concernées, les **scores de caractérisation** suivants :

[55] L'ensemble des facteurs de caractérisation est repris dans un fichier prévu à cet effet, disponible en ligne, à l'adresse URL : http://www.sph.umich.edu/riskcenter/jolliet/impact2002+.htm#form2

Catégorie intermédiaire	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
Toxicité humaine (cancérigène) [kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	3,819E-04	1,785E-02
Toxicité humaine (non cancérigène) [kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	2,021E-03	9,038E-02
Effets respiratoires [kg $PM_{2.5}$ éq. dans l'air]	1,307E-04	3,697E-04
Destruction de la couche d'ozone [kg CFC-11 éq. dans l'air]	3,193E-13	6,869E-12
Formation de photo-oxydants [kg éthylène éq. dans l'air]	9,496E-05	9,910E-05
Ecotoxicité aquatique [kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	0,791	2,421
Ecotoxicité terrestre [kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	0,489	1,245
Acidification/eutrophisation terrestre [kg SO_2 éq. dans l'air]	2,796E-03	6,656E-03
Acidification aquatique [kg SO_2 éq. dans l'air]	4,687E-04	1,204E-03
Eutrophisation aquatique [kg PO_4^{3-} éq. dans l'eau]	1,296E-04	3,693E-04
Changement climatique [kg CO_2 éq. dans l'air]	0,276	0,587

Tableau 20. Scores de caractérisation intermédiaire : comparaison des alternatives

Tel que les résultats d'inventaire semblaient l'annoncer, nous constatons, pour chaque catégorie intermédiaire d'impact, une valeur supérieure pour le couple purée surgelée et emballage. La plus faible différence entre les scénarios se situe au niveau de la formation de photo-oxydants. En effet, le score de la seconde alternative pour le changement climatique est deux fois plus élevé que celui de la purée fraîche, tandis que le rapport est encore plus important pour les autres catégories, la différence la plus marquante se situant au niveau des catégories de la toxicité humaine (cancérigènes et non cancérigènes). Ceci s'explique notamment par un **facteur de catégorisation** élevé pour les dioxines (1,79E+09 pour les effets cancérigènes et 8,70E+09 pour les effets non cancérigènes), qui, multiplié par la masse émise de celles-ci, creuse l'écart entre les deux scénarios (une fois la somme des scores des différentes substances effectuée). Du reste, nous pouvons dégager une tendance générale d'un score entre deux et trois fois plus élevé pour la seconde alternative, confirmant un impact environnemental plus marqué.

A partir des résultats intermédiaires de caractérisation, nous pouvons procéder à la **caractérisation et dommages**. Pour rappel, celle-ci permet la répartition des impacts intermédiaires dans **quatre catégories de dommages** : la santé humaine, le changement climatique, la qualité des écosystèmes et les ressources. Selon le même principe que pour la caractérisation intermédiaire, des **facteurs de caractérisation de dommages** permettent de calculer les équivalences pour chaque score intermédiaire, que l'on somme pour obtenir un score de dommage final. Rappelons que le tableau 3

(cfr. 5.4.3. Méthodes d'analyse de l'impact environnemental), reprend les facteurs de conversion pour chaque catégorie.

Sur base des scores de caractérisation intermédiaire, nous pouvons calculer les scores de dommages suivant :

Catégorie de dommages	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée
Santé humaine [DALY]	9,52E-08	4,16E-07
Qualité des écosystèmes [PDF·m²·an]	6,82E-03	1,69E-02
Changement climatique [kg éq. CO_2]	0,276	0,587

Tableau 21. Scores de caractérisation de dommages : comparaison des alternatives

Il va sans dire que, puisque les extractions de ressources n'ont pas été considérées dans la caractérisation intermédiaire, la catégorie de dommages relative aux ressources n'est pas reprise dans les résultats. On observe à nouveau des scores plus élevés pour la seconde alternative, synonymes d'un impact environnemental plus important.

Ces chiffres présentent une très faible valeur, surtout en ce qui concerne la santé humaine. Ainsi, le score de dommage nous renseigne sur le fait qu'une unité fonctionnelle de purée surgelée considérée sur l'ensemble de son cycle de vie cause la perte de 4,16E-07 année de vie (DALY – *Disability Adjusted Life Years*). Ces résultats sont donc **peu pertinents dans l'absolu** mais permettent malgré tout la comparaison entre alternatives.

6.4. Interprétation

Quatrième et dernière phase de l'ACV, l'interprétation permet de tirer des conclusions sur l'ensemble de l'étude. De ce fait, elle ne se basera pas uniquement sur les résultats obtenus à l'étape précédente, mais sur toutes les observations intermédiaires, hypothèses et constations développées tout au long de l'analyse.

Premièrement, il apparaît que le couple formé par la purée surgelée et son emballage présente des impacts environnementaux supérieurs à ceux du couple de la purée fraîche. Cette affirmation est toutefois à relativiser par les **hypothèses de départ**, à savoir :

- une composition et un procédé de fabrication de la purée considérés comme identiques pour les deux alternatives ;
- un emballage tertiaire non considéré dans la comparaison et donc dans les calculs d'inventaire ;
- l'exclusion des encres d'impression par manque de données suffisantes.

De plus, d'autres **limites** et **hypothèses** pouvant influencer les résultats de manière plus ou moins importante doivent être rappelées, notamment :

- L'hypothèse fixant la composition du film plastique composant l'emballage primaire de la purée fraîche, à savoir 50% LDPE et 50% nylon 6-6 ;
- L'hypothèse d'un taux de recyclage (matière) de 50% en poids du cageot d'emballage secondaire de la purée fraîche ;
- L'exclusion de certains flux de transport (non réfrigéré) ;
- Le choix des méthodes de résolution des problèmes d'affectation, qui peut être discuté ;
- L'utilisation de la *meilleure technique disponible* pour les calculs énergétiques, la MTD ne représentant pas forcément la réalité du terrain ;
- L'utilisation d'un facteur d'émissions basé sur le modèle suisse d'incinération des déchets ménagers dans les calculs d'inventaire liés à la fin de vie, bien que les auteurs de la base de données Ecoinvent le considèrent comme applicable aux installations européennes ;
- La qualité des données, bien qu'assez **constante** et **satisfaisante** pour l'ensemble de l'ICV, elle peut se révéler incertaine ou imparfaite.

De plus, une autre hypothèse semble avoir une incidence substantielle sur les résultats obtenus, à savoir celle de la **consommation du produit à la moitié de sa durée de vie** (50% DLC). En effet, parmi les nombreuses étapes du cycle de vie du produit, la phase de **stockage réfrigéré** est celle qui pénalise le plus la seconde alternative car elle contribue en grande partie aux émissions dans les différents milieux récepteurs et donc aux charges environnementales. Le tableau suivant permet la comparaison à titre indicatif des procédés de stockage par rapport au total d'inventaire de la purée surgelée, pour quelques substances émises dans l'air, le sol et l'eau :

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]		
	Procédés de stockage réfrigéré	Total du cycle de vie
CO_2	5,169E-01	5,604E-01
CH_4	4,994E-04	6,081E-04
$PM_{2,5}$	1,082E-04	1,504E-04
CO	2,903E-04	7,115E-04
COVNM	1,032E-04	1,361E-04
Pb	6,366E-07	7,245E-07
SO_2	1,084E-03	1,170E-03
EMISSIONS DANS LE SOL [kg]		
	Procédés de stockage réfrigéré	Total du cycle de vie
Fe	4,790E-06	2,701E-04
Cl^-	2,948E-06	6,211E-06
Zn	5,023E-08	1,385E-07
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]		
	Procédés de stockage réfrigéré	Total du cycle de vie
NH_4^+	2,543E-06	3,888E-06
Chrome VI	2,044E-06	2,249E-06
DCO	2,201E-04	5,540E-04
HAP	5,225E-09	1,018E-08

Tableau 22. Comparaison des émissions : procédés de stockage et inventaire total de la purée surgelée

L'on constate effectivement la part conséquente du stockage réfrigéré par rapport au total des émissions de la purée surgelée. On peut donc supposer qu'une **consommation plus rapide** du produit après achat, synonyme d'un **temps de séjour plus court** dans le surgélateur du consommateur, pourrait réduire les quantités de substances émises, et ainsi atténuer l'impact environnemental de la seconde alternative.

Pour évaluer ce fait, il convient d'effectuer une **étude de sensibilité** de la variation des charges environnementales en fonction de la réduction du temps séjour dans les installations de réfrigération, et plus particulièrement chez le consommateur. Pour ce faire, il nous suffit de reprendre les données utilisées pour les calculs de consommation électrique, tels que détaillés au point 6.2.5.3. (cfr. 6.2.5.3. Alternative 2 : purée surgelée), et de modifier le temps de séjour. Ainsi, en remplaçant l'hypothèse

d'une consommation du produit à 50% de sa durée de vie par **25%**, nous pouvons déduire les temps de séjour suivant :

- Temps de séjour au DC : 4 jours (données fournisseur)
- Temps de séjour au supermarché : 10 jours (maintenue identique)
- Temps de séjour chez le consommateur : **169 jours** (**nouvelle hypothèse**)

Le temps de séjour **chez le consommateur** est ainsi passé de 351 jours à 169 jours, soit un total de 183 jours pour les trois étapes de stockage, en accord avec l'hypothèse d'une consommation à 25% de la DLC.

Connaissant le volume net de 287 dm³ et la consommation électrique nette de 190 kWh/an du surgélateur, et en considérant le taux de remplissage moyen de 75%, le volume d'une unité de vente de 1,9 dm³ et le temps de séjour chez le consommateur, nous pouvons déduire les résultats suivants :

- Volume utile : 287 · 0,75 = 215,25 dm³
- Consommation nette journalière d'électricité = $\frac{190}{365}$ = 0,52 kWh/jour = 520 Wh/jour
- Consommation nette journalière d'électricité par unité de volume utile = $\frac{520}{215,25}$ = 2,42 Wh/jour
- Consommation nette journalière d'électricité **par unité fonctionnelle pour les 169 jours** dans le surgélateur = 2,42 · 1,9 · 0,6 · **169** = 465 Wh = **0,465 kWh**

Nous obtenons alors un total de **0,915 kWh** pour l'ensemble des procédés de stockage de la purée surgelée, contre 1,417 kWh avec l'hypothèse d'une consommation à 50% DLC. Ce chiffre reste toutefois élevé par rapport au 0,142 kWh consommé pour le stockage de la purée fraîche pour laquelle on aurait maintenu l'hypothèse de base (50% DLC).

Le tableau suivant montre les résultats d'inventaire obtenus pour les deux hypothèses, ainsi que les changements induits dans les données d'émissions de l'inventaire final :

EMISSIONS DANS L'AIR [kg]				
	Procédés de stockage réfrigéré (50% DLC)	Procédés de stockage réfrigéré (25% DLC)	Total du cycle de vie (50% DLC)	Total du cycle de vie (25% DLC)
CO_2	5,169E-01	3,338E-01	5,604E-01	3,772E-01
CH_4	4,994E-04	3,225E-04	6,081E-04	4,312E-04
$PM_{2,5}$	1,082E-04	6,989E-05	1,504E-04	1,121E-04
CO	2,903E-04	1,875E-04	7,115E-04	6,087E-04
COVNM	1,032E-04	6,662E-05	1,361E-04	9,950E-05
Pb	6,366E-07	4,111E-07	7,245E-07	4,990E-07
SO_2	1,084E-03	7,002E-04	1,170E-03	7,863E-04

EMISSIONS DANS LE SOL [kg]				
	Procédés de stockage réfrigéré (50% DLC)	Procédés de stockage réfrigéré (25% DLC)	Total du cycle de vie (50% DLC)	Total du cycle de vie (25% DLC)
Fe	4,790E-06	3,093E-06	2,701E-04	2,684E-04
Cl^-	2,948E-06	1,904E-06	6,211E-06	5,167E-06
Zn	5,023E-08	3,244E-08	1,385E-07	1,207E-07
EMISSIONS DANS L'EAU [kg]				
	Procédés de stockage réfrigéré (50% DLC)	Procédés de stockage réfrigéré (25% DLC)	Total du cycle de vie (50% DLC)	Total du cycle de vie (25% DLC)
NH_4^+	2,543E-06	1,642E-06	3,888E-06	2,987E-06
Chrome VI	2,044E-06	1,320E-06	2,249E-06	1,525E-06
DCO	2,201E-04	1,421E-04	5,540E-04	4,760E-04
HAP	5,225E-09	3,374E-09	1,018E-08	8,329E-09

Tableau 23. Inventaire des émissions pour les deux hypothèses de consommation du produit en fonction de sa durée de vie : comparaison sur l'étape de stockage et sur l'ensemble du cycle de vie

On constate effectivement une diminution non négligeable des émissions, avec une variation plus marquée pour le dioxyde de carbone, le plomb ou le dioxyde de soufre, et plus discrète pour les particules en suspension dans l'air ou le fer et le zinc dans le sol. Il convient dès lors d'analyser ces données en termes d'impact environnementaux. A nouveau, nous utiliserons la méthode impact 2002+. Nous nous limiterons cependant aux catégories d'impact intermédiaires.

Le tableau suivant nous permet de comparer les alternatives en fonction de l'hypothèse retenue pour la consommation du produit par rapport à sa durée de vie, influençant son temps de séjour chez le consommateur :

Catégorie intermédiaire	Alternative 1 : purée fraîche	Alternative 2 : purée surgelée (Hyp. 50% DLC)	Alternative 2 : purée surgelée (Hyp. 25% DLC)
Toxicité humaine (cancérigène) [kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	3,819E-04	1,785E-02	1,781E-02
Toxicité humaine (non cancérigène) [kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	2,021E-03	9,038E-02	9,014E-02
Effets respiratoires [kg $PM_{2.5}$ éq. dans l'air]	1,307E-04	3,697E-04	2,613E-04
Destruction de la couche d'ozone [kg CFC-11 éq. dans l'air]	3,193E-13	6,869E-12	6,847E-12
Formation de photo-oxydants [kg éthylène éq. dans l'air]	9,496E-05	9,910E-05	7,399E-05
Ecotoxicité aquatique [kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	0,791	2,421	1,886
Ecotoxicité terrestre [kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	0,489	1,245	1,091
Acidification/eutrophisation terrestre [kg SO_2 éq. dans l'air]	2,796E-03	6,656E-03	4,549E-03
Acidification aquatique [kg SO_2 éq. dans l'air]	4,687E-04	1,204E-03	8,100E-04
Eutrophisation aquatique [kg PO_4^{3-} éq. dans l'eau]	1,296E-04	3,693E-04	2,512E-04
Changement climatique [kg CO_2 éq. dans l'air]	0,276	0,587	0,399

Tableau 24. Scores de caractérisation intermédiaire : comparaison des alternatives suivant les hypothèses de consommation du produit en fonction de sa durée de vie

On constate effectivement une diminution des scores de caractérisation, cependant moins nette que pour émissions répertoriées au tableau 23. Ainsi, les résultats de la toxicité humaine cancérigène et non cancérigène ne présentent qu'une faible variation à la baisse. Le score des changements climatiques, des effets respiratoires et de l'eutrophisation aquatique se caractérisent par une diminution plus significative de l'ordre de 30%.

En ce qui concerne le couple formé par la **purée fraîche** et son emballage, aucune étape du cycle de vie ne se distingue sensiblement des autres par ses émissions. Il paraît dès lors malaisé de dégager une tendance générale pertinente. Ainsi, les procédés de fin de vie présentent la valeur d'émission la plus élevée pour le dioxyde de carbone, tandis que l'étape de stockage réfrigéré possède la valeur maximale pour les particules en suspension ($PM_{2,5}$). Toutefois, la fabrication de la barquette en polypropylène présente des maxima pour plusieurs types d'émissions **dans l'air** comme par exemple le monoxyde de carbone, le dioxyde de soufre, le méthane ou encore le bore (cfr. Annexe 4).

En conclusion, des deux alternatives proposées, la purée fraîche semble bel et bien minimiser les impacts environnementaux attribuables à une unité fonctionnelle, à savoir une portion de purée pour deux personnes. Même lorsque le temps de séjour dans les différentes installations de réfrigération,

principale source d'émissions de la purée surgelée, est réduit à un total de 183 jours au lieu de 395 jours, cette alternative reste la plus dommageable pour l'environnement, l'importante consommation électrique des surgélateurs en étant l'une des principales raisons. Rappelons tout de même l'imposante différence entre les deux alternatives en ce qui concerne les émissions liées à la fabrication de leur emballage primaire respectif, cette fois en faveur de la purée surgelée (cfr. 6.2.1.3. Comparaison des résultats).

7. PERSPECTIVES ET PISTES DE RÉFLEXION

Après la réalisation de l'analyse de cycle de vie, il s'agit d'étendre, de poursuivre la réflexion sur le sujet du présent mémoire. En effet, bien que les résultats de l'ACV puissent être utilisés tels quels pour l'aide à la prise de décision, l'analyse peut être secondée par des démarches confrontant les conclusions à la réalité économique ou sociale par exemple.

7.1. Analyse des coûts

Premièrement, les résultats peuvent être soumis à la réalité économique, l'ACV se concentrant uniquement sur les impacts environnementaux. En effet, une évaluation des flux financiers peut se révéler être un complément particulièrement adapté pour la mise en perspective des conclusions de l'analyse de cycle de vie. Parallèlement à celle-ci, il est donc possible d'étudier le « cycle de coûts », sur base de la même unité fonctionnelle que celle choisie pour l'ACV.

Nous tenterons d'esquisser une telle approche par une analyse des coûts qu'engendre chaque alternative **pour le client** à partir du moment où le produit est acheté. Pour ce faire, nous nous baserons sur le prix de vente d'une unité (de vente), ainsi que sur les coûts engendrés par la consommation d'énergie électrique pour les phases de stockage et d'utilisation.

Ainsi, un article de **purée fraîche** présente un prix de vente de **2,99 euros**[56] contre **1,99 euros**[57] pour la **purée surgelée**, soit **1,194 euros par unité fonctionnelle** de cette dernière. De plus, nous avons calculé, sur base de certaines hypothèses, l'électricité consommée pour le stockage dans le surgélateur du consommateur, soit **5,3 Wh par UF** pour la purée fraîche et **967 Wh par UF** pour la purée surgelée. De plus, la phase d'utilisation consomme **100 Wh** par UF dans le cas de la première alternative et **30 Wh** par UF pour la seconde.

Par ailleurs, le prix[58] de l'électricité est constitué des éléments suivants :

- Prix d'énergie indexé : 0,10 €/kWh au tarif normal[59]
- Utilisation du réseau de transport : 0,0103 €/kWh[60]
- Utilisation du réseau de distribution : 0,0712 €/kWh au tarif normal[61]

[56] Prix constaté dans différents supermarchés Delhaize ainsi que sur le site internet de commande en ligne de l'entreprise, à l'adresse URL : http://www.delhaizedirect.be/
[57] Op. Cit.
[58] Prix de l'électricité pour un contrat Electrabel EnergyPlus, indexés, TVA incluse
[59] Pour une consommation s'échelonnant entre 2000 et 3500 kWh
[60] Tarif SIBELGA pour la région de Bruxelles-Capitale
[61] Op. Cit.

Nous obtenons donc un total de 0,1815 euro, soit 18,15 eurocents. Nous pouvons dès lors calculer le coût total pour le consommateur par unité fonctionnelle de chaque alternative :

- Coût purée fraîche = 2,99 + (0,1053 · 0,1815) = **3,01 €**
- Coût purée surgelée = 1,194 + (0,997 · 0,1815) = **1,37 €**

Nous constatons donc que, dans ce cas précis, la réalité économique ne s'oriente pas vers la solution d'un produit plus respectueux de l'environnement. En effet, le produit le plus dommageable pour l'environnement est le plus accessible, économiquement parlant.

Il est à noter que le coût de chaque type de purée est majoritairement le fait du prix de vente, le faible coût de l'énergie ne constituant que 0,6% du coût total pour la purée fraîche contre 13,2% pour la purée surgelée. Comparativement, ce pourcentage est bien plus élevé pour la seconde alternative, mais cela est principalement la conséquence d'une consommation électrique élevée pour le stockage du produit, synonyme de charges environnementales plus importantes.

Enfin, il aurait été intéressant d'évaluer le cycle de coûts **supportés par le distributeur**, à savoir Delhaize, pour chaque alternative, puis d'en comparer les résultats et conclusions, notamment concernant la part de l'énergie dans le prix de vente, avec les résultats obtenus ci-dessus.

7.2. Recherche d'améliorations

Une analyse de cycle de vie, et plus particulièrement l'analyse de l'impact environnemental, peut être améliorée après un premier examen. Dans la pratique, les ACV sont parfois évaluées par un réviseur externe. Quelques pistes d'amélioration peuvent cependant déjà être détaillées.

L'ACV n'aurait été que plus complète si suffisamment d'informations avaient pu être obtenues sur les **encres d'impression**. Il aurait également été intéressant d'intégrer l'ensemble des **flux de transport** rencontrés sur l'entièreté du cycle de vie, puisque certains ont été exclus, notamment à cause d'un manque d'information. Il aurait en effet été nécessaire de remonter toute la filière de production des produits intermédiaires et d'identifier chaque type de transport (type de camion) et résoudre les probables problèmes d'affectation rencontrés.

Ensuite, il aurait été utile d'effectuer pour chaque alternative une analyse de l'impact environnemental de chaque étape du cycle de vie, par exemple via la méthode Impact 2002+. Les procédés auraient ainsi pu être comparés en termes d'impact et non uniquement sur les résultats d'inventaire. Parallèlement à ceci, une **analyse de sensibilité** pour chaque étape aurait également été fort utile, car permettant d'observer les variations de l'impact suite à la variation de chaque paramètre. Cela aurait permis de mettre en exergue les **points à améliorer** dans le cycle de vie du produit afin de réduire les dommages sur l'environnement occasionnés par celui-ci.

Enfin, malgré le caractère comparatif de cette ACV impliquant l'exclusion des étapes considérées comme communes, il aurait été enrichissant d'intégrer la **fabrication (industrielle) de la purée** à partir de l'étape d'acquisition des pommes de terre. Il aurait dès lors été possible de comparer l'impact environnemental d'une purée « préparée » vendue en supermarché à celui d'une purée **« faite maison »**, sur l'ensemble du cycle de vie de ces alternatives.

7.3. Questions ouvertes : pistes de réflexion

Quelques questions laissées ouvertes à la réflexion peuvent être explicitées. En effet, il convient de s'interroger sur la portée de la présente ACV et sur celle des analyses de cycle de vie en général, ainsi que sur d'autres aspects touchant aux produits étudiés qui n'ont pu être développés dans ce mémoire.

Premièrement, il convient de s'interroger sur la façon d'utiliser les résultats de l'ACV dans la **communication** sur les produits, si volonté de communication il y a. Le client doit-il être renseigné sur les caractéristiques environnementales du produit qu'il achète ? Comment doit-on envisager la communication de ce type d'information ? Quel(s) type(s) d'impact(s) doit (doivent) être utilisé(s) dans la communication ?

Deuxièmement, il aurait été intéressant de s'interroger sur l'**aspect santé** du produit et ses possibles conséquences environnementales, s'exprimant notamment par la durée de vie du produit, via la date limite de consommation. Comment est fixée la date limite de consommation ? Existe-t-il un coefficient de sécurité, dans le sens d'une DLC volontairement moins longue que la durée de vie réelle du produit afin d'éviter l'intoxication à un client qui consommerait le produit après la DLC ? Ceci a des conséquences indirectes sur les charges environnementales d'un produit. Ainsi, si le producteur choisit un coefficient de sécurité de 2, cela signifie que la DLC est fixée à la moitié de la durée de vie de l'article. Diminuer ce coefficient permettrait donc un approvisionnement moins régulier puisque le produit pourrait être conservé plus longtemps, induisant des flux de transport potentiellement moins nombreux, mais des temps de séjour dans les installations de stockage plus importants avec les conséquences environnementales que l'on connait désormais.

Enfin, il convient de s'interroger sur les **outils**, autres que l'ACV, qui permettent le développement d'une relation nouvelle entre client et distributeur, dépassant le simple cadre de la satisfaction des exigences de qualité et de prix, et s'orientant vers une **démarche commune** aux deux parties d'engagement vers un mode de consommation plus **durable**, plus en phase avec le respect de l'environnement naturel.

8. CONCLUSION

L'analyse de cycle de vie est un outil efficace d'évaluation de l'impact environnemental d'un produit, d'un service ou d'un système. La méthodologie, issue de consensus entre plusieurs institutions telles la SETAC et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, est aujourd'hui normalisée par la série de normes ISO 14040 et donc très structurée, bien que certains points, tels la résolution des problèmes d'affectation, soient encore discutés.

Ne se concentrant que sur la dimension environnementale du système étudié, l'ACV peut être judicieusement complétée par une analyse des flux financiers de l'ensemble du cycle de vie, mettant ainsi en parallèle impacts environnementaux et contraintes économiques. Les résultats peuvent alors être très utiles à la prise de décision, par exemple dans le choix d'une alternative dans le cas d'une ACV comparative. Une étude de sensibilité peut encore compléter l'analyse de l'impact et permet d'expérimenter les résultats en mettant en exergue les étapes les plus dommageables, facilitant ainsi la recherche d'améliorations.

Dans le cas de l'étude des modes de conditionnement et d'emballage d'une purée de pommes de terre, l'ACV a permis de déterminer, sous réserve de certaines hypothèses, quelle option présentait les dommages environnementaux les plus faibles.

Bien que le choix d'une méthode d'analyse de l'impact puisse être discuté, ainsi que la méthode elle-même, celle-ci a permis de traiter les résultats d'inventaire, qui, seuls, sont difficilement exploitables. Les scores de caractérisation et de dommages, obtenus grâce à la méthode Impact 2002+ facilitent la comparaison des deux alternatives, à défaut d'être pertinents dans l'absolu. En effet, un score de dommage sur la santé de 9,52E-08 DALY (années de vie perdues) pour la purée fraîche et 4,16E-07 DALY pour la purée surgelée peut sembler dérisoire. Cela devient moins négligeable si l'on multiplie ce chiffre par le nombre d'unités vendues par an, ou sur cinq ans par exemple. Ainsi, cinq millions d'unités de purée surgelée considérées sur l'ensemble de leur cycle de vie (nous parlons dans ce cas d'unités de vente et non d'unités fonctionnelles) correspondant à 3,47 années de vie perdues, ceci ne concernant qu'un seul type de produit alimentaire parmi la multitude d'articles vendus quotidiennement dans les supermarchés.

Finalement, ce dernier chiffre rend compte des impacts environnementaux de notre mode de vie et de l'industrie qui le nourrit. La nécessité de modifier nos habitudes de consommation, notamment alimentaires, nous paraît dès lors indiscutable. Cela ne peut se faire que si producteurs et consommateurs, fournisseurs et clients, entreprises et particuliers travaillent de concert. Pour atteindre un tel objectif, il semble nécessaire de définir une relation nouvelle qui dépasse les simples critères de satisfaction que sont par exemple la qualité et le prix, en s'engageant vers la production d'une part, et la consommation d'autre part, de produits et de services à l'impact environnemental réellement minimisé. Pour y parvenir, l'analyse de cycle de vie semble être un outil idéal qui pourrait encore être

perfectionné. Ces considérations semblent rejoindre la vision adoptée par Delhaize (et très probablement par d'autres entreprises de distribution) qui, par sa collaboration avec les institutions universitaires sur des sujets tels que celui de l'environnement ainsi que par l'intérêt porté par la firme à la démarche d'ACV, prouve que les bases de cette nouvelle relation ont déjà été posées.

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

9.1. Littérature

DEGREZ M., *Industrie, énergie et environnement*, Bruxelles, ULB, syllabus, 2007, 382 p.

FENNETEAU H., *Cycle de vie des produits*, Paris, Economica, 1998, 112 p.

JOLLIET O., SAADE M. et CRETTAZ P., *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, 242 p.

ROCHER E., *Conditionnement et emballage*, Paris, Editions d'Organisation – Groupe Eyrolles, 2008, 454 p.

SEYNHAVE, J.M. et VERHASSELT, P., *Environnement et énergies*, Bruxelles, ICHEC, 2007-2008.

9.2. Documents de source électronique

Chartre d'utilisation des emballages en matière plastique réutilisable, Paris, CSEMP, 2001, 20 p.

CURRAN M. A. et NOTTEN P., *Summary of Global Life Cycle Inventory Data Resources*, Task Force 1: Database Registry, SETAC/UNEP Life Cycle Initiative, 2006, 34 p.
Adresse URL : http://www.epa.gov/NRMRL/lcaccess/dataportal.html

DUVAL C., Polypropylènes (PP), *Techniques de l'Ingénieur*, 16p.
Adresse URL : http://www.techniques-ingenieur.fr

European Databasse for Corrugated Board: Life Cycle Studies, Bruxelles, FEFCO, 2009, 38 p.
Adresse URL : http://www.fefco.org/publications/other-publications.html

Glossaire de l'industrie du carton plat, Pro Carton, Association européenne des producteurs de carton plat et de cartonnages, seconde édition, 2008, 16p.
Adresse URL : http://www.procarton.com/files/publications_item/glossary_french_final.pdf

GROUPE D'EXPERT INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, *Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques*, Genève, GIEC, 2008, 114 p.
Adresse URL : http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-syr/french/wg1-summaries.pdf

GROUPE D'EXPERT INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT, *Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse*, Genève, GIEC, 2008, 114 p.
Adresse URL : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf

HISCHIER R., *Life Cycle inventories of Waste treatment services – Part II : incineration*, St Gallen, Swiss Center for Life Cycle inventories, 2009, 98 p.
Fichier accessible aux utilisateurs d'Ecoinvent, adresse URL : http://www.ecoinvent.org

JOLLIET O., MARGNI M., et CHARLES R., *Impact 2002+ : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*, International Journal of LCA, vol. 8, 2003, octobre, 7 p.
Adresse URL : http://www.springerlink.com/content/l3wv6682l677535u/

Puissance, énergie, effet calorifique, rendement, Electrotechnique, Editions de la Dunanche, 2000, 19 p. Adresse URL : http://sitelec.org/cours/rendement.pdf

REBITZER G. *et al*., *Life cycle assessment – Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*, International Environment, vol. 30, 2004, pp. 701-720
Adresse URL : http://www.sciencedirect.com

9.3. Textes de loi

Directive 89/108/CEE du Conseil, du 21 décembre 1988, relative au rapprochement des législations des États membres concernant les aliments surgelés destinés à l'alimentation humaine.

Directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil, du 20 décembre 1994, relative aux emballages et aux déchets d'emballages.

Directive 2000/13/CE du Parlement européen et du Conseil du 20 mars 2000 relative au rapprochement des législations des États membres concernant l'étiquetage et la présentation des denrées alimentaires ainsi que la publicité faite à leur égard.

Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000 relative à l'incinération des déchets.

Directive 2002/72/CE de la Commission, du 6 août 2002, concernant les matériaux et objets en matière plastique destinés à entrer en contact avec les denrées alimentaires.

Ordonnance du Conseil fédéral suisse sur la protection de l'air (814.318.142.1) du 16 décembre 1985, mise à jour par la Modification du 4 juillet 2007.

9.4. Sites internet

Blow Molding, site internet du Engineerings Handbook,
Adresse URL : http://www.engineershandbook.com/MfgMethods/blowmolding.htm
(page consultée le 02/08/10)

Définition de conditionnement, Encyclopédie Larousse en ligne,
Adresse URL : http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/conditionnement/36020
(page consultée le 12 juillet 2010)

Efficacité thermique et énergétique des meubles frigorifiques fermés, site internet d'Energie+,
Adresse URL : http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_11631.htm
(page consultée le 29/07/2010)

Description d'une opération d'extrusion, site internet d'Extrusion-Réactive,
Adresse URL : http://www.extrusion-reactive.com/extrusion1.html (page consultée le 31/07/2010)

Life Cycle Initiative, site internet du Programmes des Nations unies pour l'environnement,
Adresse URL : http://www.unep.fr/scp/lcinitiative/
(page consultée le 22/07/2010)

Optimaliser la prévention des emballages, site internet de Preventpack,
Adresse URL : http://www.preventpack.be (page consultée le 09/03/2010)

Types d'emballages, site internet de Val-I-Pack,
Adresse URL : http://www.valipac.be/Belgique/legislation/types-emballages.php
(page consultée le 09/03/2010)

Types of cartonboard, site internet de CEPI Cartonboard International Association,
Adresse URL : http://www.cepicartonboard.com/typesofcartonboard.html
(page consultée le 03/08/2010)

ANALYSE DE CYCLE DE VIE COMPARATIVE DE DEUX MODES DE CONDITIONNEMENT ET D'EMBALLAGE D'UNE PURÉE DE POMMES DE TERRE

ANNEXES

Liste des annexes

Annexe 1 : Normes ISO 14 000 dans le domaine de l'environnement et de l'analyse du cycle de vie .. 3

Annexe 2 : Potentiel de réchauffement global des principaux gaz à effet de serre 4

Annexe 3 : Test du rendement d'un four à micro-ondes 5

Annexe 4 : Tableau d'inventaire des émissions de la purée fraîche..... 6

Annexe 5 : Tableau d'inventaire des émissions de la purée surgelée 8

Annexe 6 : Facteurs de caractérisation intermédiaire des résultats d'inventaire..... 10

Annexe 1 : Normes ISO 14 000 dans le domaine de l'environnement et de l'analyse du cycle de vie

Principales normes ISO relatives au management environnemental	
ISO 14 001	Systèmes de management environnemental – Spécification et lignes directrices pour son utilisation (1996)
ISO 14 004	Systèmes de management environnemental – Lignes directrices générales concernant les principes, les systèmes et les techniques de mise en œuvre (1996)
ISO 14 021	Marquages et déclarations environnementaux – Autodéclarations environnementales (1999)
ISO 14 040	Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre (1997)
ISO 14 050	Management environnemental – Vocabulaire (2002)
Normes ISO relatives à l'analyse du cycle de vie	
ISO 14 041	Management environnemental – Analyse de l'inventaire (1998)
ISO 14 042	Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Evaluation de l'impact du cycle de vie (2000)
ISO 14 043	Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Interprétation du cycle de vie (2000)
ISO 14 048	Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Format de documentation de données (2002)
ISO 14 049	Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exemples d'application d'ISO 14 041 (2000)

Source : JOLLIET et al. (2005)

Annexe 2 : Potentiel de réchauffement global des principaux gaz à effet de serre

Gaz		Durée de vie (années)s)	Potentiel de réchauffement global (intervalle de temps en années) globe (Horizon de temps) 20 ans	100 ans	500 ans
Dioxyde de carbone	CO_2		1	1	1
Méthane[a]	CH_4	12,0[b]	62	23	7
Oxyde nitreux	N_2O	114[b]	275	296	156
Hydrocarbures fluorés					
HFC-23	CHF_3	260	9400	12000	10000
HFC-32	CH_2F_2	5,0	1800	550	170
HFC-41	CH_3F	2,6	330	97	30
HFC-125	CHF_2CF_3	29	5900	3400	1100
HFC-134	CHF_2CHF_2	9,6	3200	1100	330
HFC-134a	CH_2FCF_3	13,8	3300	1300	400
HFC-143	CHF_2CH_2F	3,4	1100	330	100
HFC-143a	CF_3CH_3	52	5500	4300	1600
HFC-152	CH_2FCH_2F	0,5	140	43	13
HFC-152a	CH_3CHF_2	1,4	410	120	37
HFC-161	CH_3CH_2F	0,3	40	12	4
HFC-227ea	CF_3CHFCF_3	33	5600	3500	1100
HFC-236cb	$CH_2FCF_2CF_3$	13,2	3300	1300	390
HFC-236ea	CHF_2CHFCF_3	10	3600	1200	390
HFC-236fa	$CF_3CH_2CF_3$	220	7500	9400	7100
HFC-245ca	$CH_2FCF_2CHF_2$	5,9	2100	640	200
HFC-245fa	$CHF_2CH_2CF_3$	7,2	3000	950	300
HFC-365mfc	$CF_3CH_2CF_2CH_3$	9,9	2600	890	280
HFC-43-10mee	$CF_3CHFCHFCF_2CF_3$	15	3700	1500	470
fluorées					
SF_6		3200	15100	22200	32400
CF_4		50000	3900	5700	8900
C_2F_6		10000	8000	11900	18000
C_3F_8		2600	5900	8600	12400
C_4F_{10}		2600	5900	8600	12400
c-C_4F_8		3200	6800	10000	14500
C_5F_{12}		4100	6000	8900	13200
C_6F_{14}		3200	6100	9000	13200
Éthers et éthers halogénés					
CH_3OCH_3		0,015	1	1	<<1
HFE-125	CF_3OCHF_2	150	12900	14900	9200
HFE-134	CHF_2OCHF_2	26,2	10500	6100	2000
HFE-143a	CH_3OCF_3	4,4	2500	750	230
HCFE-235da2	$CF_3CHClOCHF_2$	2,6	1100	340	110
HFE-245fa2	$CF_3CH_2OCHF_2$	4,4	1900	570	180
HFE-254cb2	$CHF_2CF_2OCH_3$	0,22	99	30	9
HFE-7100	$C_4F_9OCH_3$	5,0	1300	390	120
HFE-7200	$C_4F_9OC_2H_5$	0,77	190	55	17
H-Galden 1040x	$CHF_2OCF_2OC_2F_4OCHF_2$	6,3	5900	1800	560
HG-10	$CHF_2OCF_2OCHF_2$	12,1	7500	2700	850
HG-01	$CHF_2OCF_2CF_2OCHF_2$	6,2	4700	1500	450

Source : GIEC (2001)

Annexe 3 : Test du rendement d'un four à micro-ondes

Protocole de mesure :

On mesure la monté en T° d'une certaine quantité d'eau. On veillera à ne pas faire bouillir l'eau évidement.

Hypothèses :

- Capacité calorifique de l'eau constante.
- Température homogène dans le récipient (pas de gradiant) durant la mesure (mélange mécanique effectué avant mesure).
- Mesure réalisée sur 1L d'eau.
- Mesure de puissance réalisée avec le PM230 :

- Mesure de température réalisée avec l'ITC-777 (sonde K) en mode 0,1°C
- Micro-ondes de 1300W de marque Galanz
- Durée de la mesure réalisé avec un chronomètre électronique

Mesures :

Volume d'eau : 1L
T° initiale : 17,7°C
T° finale : 57,6°C
Durée de l'essai : 5min soit 300s
Puissance absorbée : de 1270W à t=0s à 1130W à t=300s.
Tension : 232V.
Cos phi : 0,97
Intensité : de 5,64 à 5,02 A.

On considère que la puissance diminue linéairement sur la plage de mesure, soit 1200W de moyenne.

Calcul de l'énergie et du rendement :

a) Energie absorbée : 1200*300=360 000 Joules
b) Energie utile (réstituée à l'eau) : Cp*DeltaT*Masse = 4,18*(57,6-17,7)*1000= 166 782.

Rendement global du four à micro onde : 167/360 = 46,4%

Annexe 4 : Tableau d'inventaire des émissions de la purée fraîche

	Substance	Barquette PP	Film PA/PE	Etui carton	Cageot PP	Transport réfrigéré	Stockage réfrigéré	Utilisation	Fin de vie	**TOTAL**
AIR	CO_2	5,37E-02	5,88E-03	3,23E-02	2,41E-02	4,57E-03	5,18E-02	3,65E-02	6,04E-02	2,69E-01
	CH_4	2,54E-04	4,35E-05	7,49E-05	1,21E-04	4,06E-06	5,01E-05	3,52E-05	3,61E-06	5,86E-04
	CO	1,21E-04	6,84E-06	2,26E-05	5,55E-05	1,05E-05	2,91E-05	2,05E-05	1,23E-05	2,78E-04
	COVNM	7,08E-05	6,23E-06	1,29E-05	3,27E-05	3,48E-06	1,03E-05	7,28E-06	5,28E-06	1,49E-04
	HCl	2,18E-06	2,42E-07	8,27E-07	8,88E-07	1,09E-08	1,71E-06	1,20E-06	6,66E-08	7,13E-06
	$PM_{2,5}$	8,05E-06	5,83E-07	6,16E-06	3,29E-06	2,79E-06	1,08E-05	7,64E-06	1,09E-06	4,04E-05
	NO_X	9,72E-05	1,22E-05	6,66E-05	4,45E-05	3,13E-05	8,89E-05	6,25E-05	2,27E-05	4,26E-04
	Pb	7,56E-09	1,95E-10	1,17E-08	2,92E-09	7,01E-10	6,38E-08	4,49E-08	1,39E-09	1,33E-07
	Bore (B)	1,51E-07	3,40E-09	8,15E-08	6,17E-08	9,24E-10	6,99E-08	4,92E-08	3,92E-09	4,22E-07
	N_2O	6,00E-07	4,93E-07	1,52E-06	3,44E-07	2,26E-07	1,79E-06	1,26E-06	2,20E-07	6,46E-06
	Dioxines	1,31E-14	1,96E-16	1,88E-14	1,70E-15	1,27E-16	6,31E-15	4,44E-15	1,77E-13	2,22E-13
	CFC-113	6,06E-14	2,11E-15	1,91E-13	2,74E-14	6,31E-16	6,40E-15	4,51E-15	2,63E-14	3,19E-13
	Fluor (F)	1,24E-08	2,83E-10	1,77E-08	5,00E-09	8,52E-11	1,01E-07	7,13E-08	3,90E-10	2,08E-07
	Furanes	1,31E-10	5,01E-12	4,11E-09	1,78E-12	1,45E-12	5,37E-12	3,78E-12	1,28E-12	4,26E-09
	HF	2,47E-07	1,25E-08	1,47E-07	1,02E-07	1,73E-09	7,00E-07	4,92E-07	7,44E-09	1,71E-06
	H_2S	1,58E-07	2,24E-09	1,57E-07	4,81E-08	5,77E-10	7,54E-08	5,30E-08	5,09E-09	4,99E-07
	Hg	6,95E-10	2,53E-11	8,30E-10	3,13E-10	3,86E-11	1,21E-09	8,54E-10	1,41E-10	4,11E-09
	Ozone (O_3)	1,46E-07	3,27E-09	1,53E-07	5,93E-08	9,47E-10	7,13E-07	5,02E-07	3,93E-09	1,58E-06
	HAP	1,53E-09	4,16E-11	2,67E-09	8,60E-10	5,33E-11	6,26E-09	4,41E-09	2,72E-10	1,61E-08
	SF_6	2,20E-09	4,93E-11	1,82E-09	9,02E-10	1,37E-11	1,33E-08	9,37E-09	4,87E-11	2,77E-08
	Toluène	3,01E-08	1,65E-09	7,90E-08	1,73E-08	1,21E-08	4,51E-08	3,17E-08	4,27E-08	2,60E-07
	Xylène	1,01E-07	2,63E-09	8,60E-08	4,14E-08	8,32E-09	1,75E-07	1,23E-07	2,22E-08	5,59E-07
	Ethane (C_2H_6)	4,93E-07	1,35E-08	6,83E-07	3,44E-07	2,75E-08	1,33E-06	9,36E-07	2,88E-08	3,85E-06
	Hexane (C_6H_{14})	7,27E-08	1,83E-09	2,69E-07	2,95E-08	4,03E-08	3,87E-07	2,72E-07	1,71E-08	1,09E-06
	Formol	4,50E-08	9,22E-10	6,71E-08	1,64E-08	1,18E-09	5,53E-08	3,89E-08	9,94E-09	2,35E-07
	SO_2	1,30E-04	1,62E-05	6,15E-05	5,74E-05	5,16E-06	1,09E-04	7,65E-05	3,37E-06	4,59E-04

	Substance	Barquette PP	Film PA/PE	Etui carton	Cageot PP	Transport réfrigéré	Stockage réfrigéré	Utilisation	Fin de vie	**TOTAL**
SOL	Fe	3,31E-07	6,68E-09	2,60E-07	1,06E-07	8,51E-08	4,80E-07	3,38E-07	3,15E-07	1,92E-06
	Pb	1,22E-10	3,80E-12	6,39E-10	3,39E-11	3,28E-10	1,61E-10	1,13E-10	6,15E-11	1,46E-09
	Cl^-	1,71E-06	8,19E-08	4,65E-06	1,42E-06	1,79E-07	2,96E-07	2,08E-07	2,49E-06	1,10E-05
	Zn	6,02E-09	2,00E-10	3,22E-08	1,94E-09	2,30E-08	5,04E-09	3,54E-09	4,27E-09	7,62E-08
	F^-	6,22E-09	1,40E-10	8,54E-09	2,62E-09	1,73E-09	1,36E-07	9,56E-08	7,57E-10	2,51E-07
	Cd	1,73E-11	4,66E-13	1,29E-10	3,88E-12	8,02E-12	3,41E-11	2,40E-11	1,87E-12	2,19E-10
	Ni	1,06E-10	3,23E-12	4,17E-10	1,95E-11	1,03E-10	1,34E-10	9,44E-11	2,12E-11	8,99E-10
EAU	NH_4^+	1,64E-07	1,26E-06	2,19E-06	5,79E-08	6,68E-09	2,55E-07	1,79E-07	6,87E-09	4,12E-06
	DCO	7,44E-05	1,50E-05	2,15E-04	2,75E-05	1,47E-05	2,21E-05	1,55E-05	4,01E-04	7,85E-04
	Hg	4,76E-09	2,32E-10	4,19E-09	2,00E-09	3,14E-11	5,15E-09	3,62E-09	2,73E-10	2,02E-08
	Phosphates	5,01E-05	1,36E-06	2,85E-05	2,06E-05	3,41E-07	6,41E-05	4,51E-05	1,57E-06	2,12E-04
	Sulfates	1,26E-03	3,68E-05	7,14E-04	5,26E-04	8,57E-06	1,64E-03	1,15E-03	7,32E-05	5,41E-03
	Nitrates	1,87E-05	1,98E-05	3,87E-05	7,09E-06	1,05E-07	1,66E-05	1,16E-05	2,12E-06	1,15E-04
	Cl^-	1,29E-04	7,41E-06	1,87E-04	5,89E-05	4,10E-05	1,71E-04	1,20E-04	7,38E-05	7,88E-04
	Chrome VI	2,23E-07	2,19E-08	1,12E-07	9,43E-08	2,73E-09	2,05E-07	1,44E-07	5,73E-08	8,61E-07
	F^-	1,43E-06	1,04E-07	1,93E-06	6,88E-07	2,05E-08	8,35E-06	5,87E-06	4,63E-07	1,89E-05
	Pb	9,83E-08	5,44E-09	9,23E-07	3,49E-08	1,11E-09	3,16E-08	1,58E-07	8,90E-08	1,34E-06
	HAP	3,46E-10	9,50E-12	9,60E-10	1,49E-10	4,54E-10	5,24E-10	3,69E-10	1,79E-10	2,99E-09
	Toluène	6,99E-09	1,94E-10	2,06E-08	3,05E-09	1,01E-08	1,04E-08	7,33E-09	3,84E-09	6,25E-08

Annexe 5 : Tableau d'inventaire des émissions de la purée surgelée

	Substance	Poche LDPE	Boite carton (emball. sec.)	Transport réfrigéré	Stockage réfrigéré	Utilisation	Fin de vie	**TOTAL**
AIR	CO_2	1,161E-02	5,346E-03	5,484E-03	5,169E-01	1,094E-02	1,006E-02	5,604E-01
	CH_4	5,836E-05	3,198E-05	4,584E-06	4,994E-04	1,057E-05	3,147E-06	6,081E-04
	CO	1,259E-05	3,776E-04	1,731E-05	2,903E-04	6,147E-06	7,509E-06	7,115E-04
	COVNM	1,529E-05	6,634E-06	4,708E-06	1,032E-04	2,184E-06	4,064E-06	1,361E-04
	HCl	5,302E-07	2,486E-07	1,338E-08	1,706E-05	3,612E-07	6,589E-08	1,828E-05
	$PM_{2,5}$	2,049E-06	3,238E-05	4,496E-06	1,082E-04	2,292E-06	9,515E-07	1,504E-04
	NO_X	2,282E-05	1,024E-05	4,551E-05	8,862E-04	1,876E-05	1,599E-05	9,995E-04
	Pb	2,247E-09	7,010E-08	7,719E-10	6,366E-07	1,348E-08	1,322E-09	7,245E-07
	Bore (B)	4,551E-08	3,606E-08	1,131E-09	6,969E-07	1,475E-08	3,909E-09	7,982E-07
	N_2O	1,912E-07	1,427E-06	2,901E-07	1,786E-05	3,782E-07	1,661E-07	2,032E-05
	Dioxines	3,243E-15	1,027E-11	1,568E-16	6,293E-14	1,332E-15	2,759E-14	1,037E-11
	CFC-113	2,657E-14	6,750E-12	7,149E-16	6,385E-14	1,352E-15	2,644E-14	6,869E-12
	Fluor (F)	3,635E-09	6,170E-09	1,030E-10	1,010E-06	2,139E-08	3,834E-10	1,042E-06
	Furanes	1,830E-11	5,412E-09	1,788E-12	5,357E-11	1,134E-12	1,255E-12	5,488E-09
	HF	7,040E-08	1,323E-07	2,112E-09	6,978E-06	1,477E-07	7,137E-09	7,338E-06
	H_2S	3,339E-08	2,188E-06	7,070E-10	7,517E-07	1,591E-08	3,770E-09	2,994E-06
	Hg	2,578E-10	2,648E-09	4,938E-11	1,210E-08	2,561E-10	1,226E-10	1,543E-08
	Ozone (O_3)	4,168E-08	6,911E-08	1,147E-09	7,108E-06	1,505E-07	3,887E-09	7,374E-06
	HAP	4,762E-10	6,918E-08	6,414E-11	6,243E-08	1,322E-09	2,489E-10	1,337E-07
	SF_6	6,308E-10	4,195E-07	1,667E-11	1,328E-07	2,812E-09	4,815E-11	5,558E-07
	Toluène	9,115E-09	3,482E-08	1,233E-08	4,496E-07	9,519E-09	2,603E-08	5,414E-07
	Xylène	2,988E-08	7,115E-06	9,981E-09	1,744E-06	3,693E-08	2,271E-08	8,959E-06
	Ethane (C_2H_6)	1,579E-07	7,824E-07	3,342E-08	1,326E-05	2,807E-07	2,199E-08	1,453E-05
	Hexane (C_6H_{14})	2,094E-08	4,031E-09	4,841E-08	3,858E-06	8,167E-08	1,702E-08	4,030E-06
	Formaldéhyde	1,073E-08	2,266E-08	1,258E-09	5,514E-07	1,167E-08	9,256E-09	6,070E-07
	SO_2	3,517E-05	1,795E-05	6,819E-06	1,084E-03	2,296E-05	3,233E-06	1,170E-03

	Substance	Poche LDPE	Boite carton (emball. sec.)	Transport réfrigéré	Stockage réfrigéré	Utilisation	Fin de vie	**TOTAL**
SOL	Fe	1,005E-07	2,647E-04	1,031E-07	4,790E-06	1,014E-07	3,197E-07	2,701E-04
	Pb	2,843E-11	3,336E-07	3,370E-10	1,606E-09	3,400E-11	6,200E-11	3,357E-07
	Cl^-	2,492E-07	2,000E-07	2,111E-07	2,948E-06	6,242E-08	2,541E-06	6,211E-06
	Zn	1,377E-09	5,774E-08	2,374E-08	5,023E-08	1,064E-09	4,296E-09	1,385E-07
	F^-	1,699E-09	9,619E-09	2,144E-09	1,355E-06	2,869E-08	7,423E-10	1,398E-06
	Cd	3,922E-12	8,258E-10	8,255E-12	3,404E-10	7,208E-12	1,881E-12	1,187E-09
	Ni	2,449E-11	2,440E-09	1,061E-10	1,337E-09	2,832E-11	2,139E-11	3,958E-09
EAU	$NH4^+$	3,592E-08	1,241E-06	8,108E-09	2,543E-06	5,383E-08	6,791E-09	3,888E-06
	DCO	3,572E-05	2,158E-04	1,855E-05	2,201E-04	4,661E-06	5,918E-05	5,540E-04
	Hg	1,357E-09	3,716E-08	3,850E-11	5,131E-08	1,086E-09	2,958E-10	9,125E-08
	Phosphates	1,445E-05	1,778E-05	4,203E-07	6,397E-04	1,354E-05	1,513E-06	6,874E-04
	Sulfates	3,793E-04	4,131E-04	1,057E-05	1,633E-02	3,457E-04	5,347E-05	1,753E-02
	Nitrates	4,630E-06	7,980E-05	1,287E-07	1,651E-04	3,496E-06	1,481E-06	2,547E-04
	Cl^-	3,459E-05	1,105E-04	5,007E-05	1,701E-03	3,602E-05	7,817E-05	2,011E-03
	Chrome VI	6,088E-08	6,602E-08	3,354E-09	2,044E-06	4,327E-08	3,197E-08	2,249E-06
	F^-	4,353E-07	1,319E-06	2,599E-08	8,324E-05	1,762E-06	2,338E-07	8,702E-05
	Pb	1,255E-09	5,762E-08	1,303E-09	2,239E-06	4,740E-08	1,102E-07	2,457E-06
	HAP	1,057E-10	4,003E-09	5,577E-10	5,225E-09	1,106E-10	1,783E-10	1,018E-08
	Toluène	2,157E-09	1,237E-08	1,445E-08	1,039E-07	2,200E-09	3,831E-09	1,389E-07

Annexe 6 : Facteurs de caractérisation intermédiaire des résultats d'inventaire

	Toxicité humaine : effets cancerigènes	Toxicité humaine : effets non concérigènes	Effets respiratoires	Destruction de la couche d'ozone	Formation de photo-oxydants	Ecotoxicité aquatique	Ecotoxicité terrestre	Acidification aquatique	Eutrophisation aquatique	Acidification /Eutrophisation terrestre	Changement climatique
	[kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	[kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	[kg $PM_{2,5}$ éq. dans l'air]	[kg CFC-11 éq. dans l'air]	[kg éthylène éq. dans l'air]	[kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	[kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	[kg SO_2 éq. dans l'air]	[kg PO_4^{3-} éq. dans l'eau]	[kg SO2 éq. dans l'air]	[kg CO_2 éq. dans l'air]
AIR											
CO_2											1,00E+00
CH_4					6,01E-03						7,00E+00
CO			1,04E-03								1,57E+00
COVNM					6,01E-01						
HCl								0,88			
$PM_{2,5}$			1,00E+00								
NO_X			1,27E-01							5,49E+00	
Pb		2,60E+00				4,01E+04	1,31E+05				
Bore (B)											
N_2O											1,56E+02
Dioxines	1,72E+09	8,70E+09				3,94E+05	2,59E+02				
CFC-113		5,99E-05		1,00E+00		2,12E+02	1,22E+02				2,70E+03
Fluor (F)											
Furanes	7,52E-03	2,27E-04									
HF								1,60			
H_2S		3,05E-01						1,88			
Hg		3,81E+02				7,86E+05	3,84E+06				
Ozone (O3)											
HAP											
SF_6											3,24E+04
Toluène	2,04E-05	3,38E-03			6,38E-01	5,37E-02	4,16E-03				
Xylène		8,40E-03			1,04E+00	6,16E-02	1,55E-03				
Ethane (C_2H_6)					1,24E-01						
Hexane (C_6H_{14})		2,96E-03			4,79E-01	6,25E-05	1,59E-05				
Formaldéhyde	9,06E-01	3,27E+00			5,21E-01	1,67E+00	2,54E+00				
SO_2			7,80E-02					1,00		1,00E+00	

	Toxicité humaine : effets cancerigènes	Toxicité humaine : effets non concérigènes	Effets respiratoires	Destruction de la couche d'ozone	Formation de photo-oxydants	Ecotoxicité aquatique	Ecotoxicité terrestre	Acidification aquatique	Eutrophisation aquatique	Acidification /Eutrophisation terrestre	Changement climatique
	[kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	[kg chlorure de vinyle éq. dans l'air]	[kg $PM_{2,5}$ éq. dans l'air]	[kg CFC-11 éq. dans l'air]	[kg éthylène éq. dans l'air]	[kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	[kg triéthylène glycol éq. dans l'eau]	[kg SO_2 éq. dans l'air]	[kg PO_4^{3-} éq. dans l'eau]	[kg SO2 éq. dans l'air]	[kg CO_2 éq. dans l'air]
SOL											
Fe						0,00E+00	0,00E+00				
Pb		1,58E+01				2,64E+05	7,54E+05				
Cl-											
Zn		7,45E+02				1,40E+06	5,91E+06				
F-											
Cd		4,41E+03				2,91E+06	5,28E+06				
Ni		3,42E+01				1,26E+06	3,30E+06				
EAU											
$NH4^+$									0,165		
DCO									0,022		
Hg		7,95E+02				1,58E+07	6,93E-08				
Phosphates									0,5		
Sulfates											
Nitrates									0,05		
Cl-											
Chrome VI		2,66E+00									
F-											
Pb		1,07E+01				2,64E+05	0,00E+00				
HAP											
Toluène	6,85E-02	1,27E-02				2,98E+03	1,40E-03				