



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées
Laboratoire de Chimie Industrielle
Professeur A. Germain

Influence de l'utilisation des combustibles de substitution sur le cycle de vie du ciment



Travail de fin d'études présenté par
Sandra BELBOOM
en vue de l'obtention du grade
d'Ingénieur Civil Chimiste

Année académique 2007-2008

Résumé

Dans ce travail de fin d'études, nous avons appliqué la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), également appelée méthodologie LCA (Life Cycle Assessment) à trois systèmes produisant du ciment et utilisant chacun un taux différent d'utilisation des combustibles de substitution.

Les trois systèmes envisagés sont :

- Le système CBR Lixhe se basant sur les données techniques de 2006 de l'usine CBR Lixhe. Il utilise les combustibles de substitution pour plus de 50% des besoins en énergie du four de clinkérisation.
- Le système BREF charbon qui est une modélisation d'une cimenterie se basant sur les émissions du document BREF Ciment et Chaux de 2001. Il utilise uniquement des combustibles fossiles, à savoir du gaz naturel et du charbon noir.
- Le système SimaPro7.1 qui utilise la base de données Ciment de Portland du logiciel SimaPro7.1.

L'évaluation des impacts environnementaux a été réalisée en utilisant la méthode normalisée (ISO 14042) Eco-Indicator 99.

D'après les valeurs des scores globaux, quelle que soit la perspective envisagée, la charge environnementale du système CBR Lixhe sera moindre que celle du système SimaPro7.1 qui elle-même est moindre que celle du système BREF Charbon.

En ce qui concerne les étapes des deux premiers systèmes envisagés (le système SimaPro7.1 n'est pas décomposable en étapes vu la globalité de la base de données), le four est l'étape prépondérante pour l'impact environnemental, ce qui était attendu.

Dans le cadre de la perspective Hiérarchiste, définie dans la méthode Eco-Indicator 99 et employée dans ce travail, les dommages affectent tout d'abord la Santé humaine, puis les Ressources (extraction des combustibles fossiles) et enfin la Qualité de l'écosystème, et ce pour les trois systèmes envisagés.

Dans le but de vérifier la validité du modèle, des systèmes et des hypothèses de travail, nous avons effectué une analyse de sensibilité. Les résultats obtenus lors de celle-ci montrent que, vu les données de départ, les systèmes sont correctement définis et que la méthodologie LCA – Eco-Indicator 99 est applicable au cycle envisagé. Ils mettent également en évidence les paramètres clés qui modifient de façon notable les scores globaux et qui pourront être régulés afin d'obtenir le meilleur score possible pour le cycle du ciment.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur Albert Germain pour m'avoir proposé ce travail de fin d'études au sujet actuel et très intéressant, pour m'avoir accueillie dans son Laboratoire de Chimie Industrielle ainsi que pour ses conseils judicieux.

J'adresse ma profonde reconnaissance à Monsieur Hubert Halleux, ancien assistant du laboratoire de Chimie Industrielle, pour son aide inestimable à la réalisation de ce travail. Sa bonne humeur, sa grande disponibilité et son écoute ont permis de développer un climat agréable qui a assuré le bon déroulement de ce travail. Je tiens à le remercier pour ses conseils et ses explications, ainsi que pour m'avoir fait bénéficier de sa grande expérience en ce qui concerne l'analyse LCA « Life Cycle Assessment ».

Mes remerciements vont également à Monsieur Robert Renzoni pour ses explications ainsi que pour la mise à disposition de données utiles à ce travail.

Ensuite, je voudrais remercier la société CBR et plus particulièrement Monsieur Pierre-Olivier Cambier, ingénieur de procédé de la société CBR, pour l'organisation de la visite du site CBR Lixhe ainsi que pour les nombreuses informations techniques qui m'ont été fournies.

Finalement, j'exprime ma gratitude à toutes les personnes ayant de près ou de loin contribué au bon cheminement et à la réussite de ce travail, et notamment toutes les personnes de la Faculté des Sciences Appliqués ayant pris part à la formation que j'ai reçue durant ces cinq années.

Table des matières

CHAPITRE I. INTRODUCTION	1
CHAPITRE II. OBJECTIFS	2
CHAPITRE III. LA PRODUCTION DU CIMENT, GENERALITES	3
III.1. Définition du ciment	3
III.2. Etapes de fabrication du ciment	3
III.2.1. Calcination et clinkérisation	3
III.2.2. Les différents procédés de fabrication	6
III.2.3. La mouture	7
III.2.4. Stockage et conditionnement	8
CHAPITRE IV. DESCRIPTION DE LA PRODUCTION DU CIMENT POUR LES DIFFERENTS SYSTEMES ENVISAGES	9
IV.1. Fabrication du ciment à CBR Lixhe	9
IV.1.1. Situation de l'usine	9
IV.1.2. Etapes de fabrication du ciment	9
IV.1.2.1. L'extraction des matières premières	9
IV.1.2.2. Fabrication du clinker	11
IV.1.2.3. La mouture	13
IV.1.2.4. Emballage et expédition	14
IV.2. Fabrication du ciment se basant sur les émissions du BREF (Best REferences)	14
IV.2.1. Techniques de réduction des polluants	15
IV.2.1.1. Réduction des NO _x	15
IV.2.1.2. Réduction des SO _x	18
IV.2.1.3. Réduction des dioxines et furanes	19
IV.2.1.4. Réduction des métaux	19
IV.2.1.5. Réduction des poussières	20
IV.3. Fabrication du ciment suivant la base de données du logiciel SimaPro7.1	20
IV.4. Valorisation des déchets	21
CHAPITRE V. METHODOLOGIE LCA	23
V.1. Définition	23
V.2. Applications	23
V.3. Limitations	24
V.4. Procédure	24
V.4.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude	24
V.4.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie	25
V.4.3. Evaluation de l'impact	25
V.4.4. Interprétation des résultats	25

V.5. Méthode Eco – Indicator 99	26
V.5.1. Catégories de dommages	26
V.5.2. Modélisation des dommages	27
V.5.2.1. Santé humaine	27
V.5.2.2. Qualité de l'écosystème	27
V.5.2.3. Ressources	28
V.5.3. Evaluation des dommages	29
V.5.3.1. Normalisation	29
V.5.3.2. Pondération	29
V.5.3.3. Tableau de synthèse	29
V.5.4. Perspective Culturelle	30

CHAPITRE VI. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE LCA A UN CYCLE DE PRODUCTION DU CIMENT

31

VI.1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude	31
VI.1.1. Objectif de l'étude	31
VI.1.1.1. Applications prévues	31
VI.1.1.2. Raisons pour effectuer l'étude	31
VI.1.1.3. Cibles visées	31
VI.1.2. Champ de l'étude	32
VI.1.2.1. Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence	32
VI.1.2.2. Frontières des systèmes	32
VI.1.2.3. Description des catégories de données	35
VI.1.2.4. Critères pour l'inclusion initiale des intrants et des sortants	35
VI.1.2.5. Exigences relatives à la qualité des données	35
VI.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie	36
VI.2.1. Mode opératoire de recueil des données	36
VI.2.1.1. Provenance des données SimaPro7.1	36
VI.2.1.2. Système CBR Lixhe et production d'électricité	36
VI.2.1.3. Système basé sur le BREF et incinération des déchets	37
VI.2.1.4. Système SimaPro7.1 complété d'un incinérateur et d'une centrale électrique	37
VI.2.2. Description qualitative et quantitative des processus élémentaires	37
VI.2.2.1. Système CBR Lixhe	37
VI.2.2.2. Système basé sur le BREF et incinération des déchets	45
VI.2.2.3. Système SimaPro7.1 complété d'un incinérateur et d'une centrale électrique	47
VI.2.3. Sources de documents publiés	48
VI.2.4. Procédures de calcul	49
VI.2.5. Validation des données	49
VI.2.6. Analyse de sensibilité pour affinement des frontières	49
VI.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie	49
VI.3.1. Choix des catégories d'impacts, des indicateurs et des modèles	49
VI.3.2. Classification	49
VI.3.3. Caractérisation	51
VI.3.4. Normalisation	51
VI.3.5. Pondération	51

CHAPITRE VII. RESULTATS

52

VII.1. Identification des résultats les plus significatifs	52
VII.1.1. Caractérisation, normalisation, pondération.	52
VII.1.1.1. Explications des différences entre les systèmes envisagés	55
VII.1.2. Scores pondérés des étapes constituant les systèmes envisagés	59

VII.1.2.1. Système CBR Lixhe	59
VII.1.2.2. Système se basant sur le BREF et n'utilisant que du charbon	63
VII.1.2.3. Comparaison des deux systèmes précédents en termes d'étapes	65
VII.1.2.4. Système basé sur le logiciel SimaPro7.1	66
VII.2. Analyse de sensibilité	67
VII.2.1. Sensibilité du système	67
VII.2.1.1. Système CBR Lixhe	67
VII.2.1.2. Système BREF Charbon	69
VII.2.2. Sensibilité de la méthode	73
CHAPITRE VIII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	75
VIII.1. Conclusions	75
VIII.2. Perspectives	78
CHAPITRE IX. BIBLIOGRAPHIE	79
CHAPITRE X. ANNEXES	82
Annexe 1. Résumé des normes ISO/FDIS 14040-14043	82
Annexe 2. Calcul de l'unité fonctionnelle	87
Annexe 3. Calcul des valeurs du système SimaPro7.1	88
Annexe 4. Données et hypothèses utilisées pour le système CBR Lixhe	89
Annexe 5. Données et hypothèses utilisées pour le système BREF Charbon.	91
Annexe 6. Données utilisées pour la modélisation de l'incinération	94
Annexe 7. Composition des combustibles de substitution	98
Annexe 8. Calcul du dioxyde de carbone pour les systèmes CBR et BREF Charbon	102
Annexe 9. Calcul du transport des réactifs	104
Annexe 10. Tableaux et graphiques des résultats principaux	105
Annexe 11. Tableaux et graphiques de résultats pour l'analyse de sensibilité du système	111
Annexe 12. Tableaux et graphiques de résultats pour l'analyse de sensibilité de la méthode	115

CHAPITRE I. INTRODUCTION

Matériau de base pour les constructions, le ciment fait partie de notre vie de tous les jours. Il fait partie des matériaux les plus anciennement utilisés par l'homme et est actuellement un des plus employés. Il permet de répondre aux besoins fondamentaux que constituent les logements ou les infrastructures pour la société civile.

Son industrie peut être directement reliée à l'état du marché de la construction en général ainsi qu'à la situation économique d'un pays. La production mondiale n'a cessé d'augmenter depuis 1950, avec une croissance particulièrement importante pour les pays en voie de développement dans les dernières décennies. En 2006, la consommation mondiale a poursuivi sa progression et la production a gagné environ 12%. Une augmentation de la productivité due à l'introduction d'unités de production plus importantes ainsi qu'à l'automatisation plus poussée de certaines étapes du procédé peut également être observée.

En Belgique, et en Wallonie, l'industrie du ciment occupe une place importante dans l'économie de la région et du pays. Malgré tout, elle fait l'objet de critiques vu son utilisation importante d'énergie, et ses rejets dans l'environnement. L'heure est à la prise de conscience des enjeux environnementaux, du développement durable et à une focalisation particulière sur le changement climatique. Le but à atteindre pour les industries est de continuer à se développer et à produire, sans compromettre les besoins des générations futures. Plusieurs actions ont été développées dans ce sens, afin de réduire les impacts et de fournir des réponses viables à long terme. Parmi celles-ci se trouvent la valorisation des déchets en four de cimenterie, à laquelle nous allons porter un intérêt tout particulier.

Cette valorisation entre dans le cadre de la gestion des déchets préconisée par l'Union Européenne. Ce cadre repose sur une hiérarchisation des modes de traitement de déchets, le but premier étant d'empêcher la production de déchets. Si celle-ci est incontournable, la valorisation doit être trouvée avant l'élimination car cette dernière ne permet pas ou peu d'économiser des ressources fossiles.

Les cimentiers utilisant des combustibles de substitution se doivent évidemment de surveiller les rejets environnementaux entraînés par la combustion de ces déchets afin qu'ils n'amènent pas plus de mal que de bien. En plus de la réduction de la consommation des combustibles fossiles, l'utilisation des combustibles de substitution permet également d'éviter l'extraction de matières premières nécessaires à la fabrication d'un clinker et d'un ciment de qualité, les composants nécessaires se trouvant alors dans les déchets brûlés.

L'industrie cimentière doit atteindre son objectif tout en préservant l'environnement. Elle se doit donc d'appliquer une politique globale, une approche qui prend en compte tous les aspects de la problématique. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV ou LCA : « Life Cycle Assessment ») est une méthodologie normalisée (ISO 14040 -14043) particulièrement bien adaptée pour une telle approche. Elle constitue, en effet, un outil d'aide très important dans l'évaluation des impacts environnementaux, en donnant accès à des informations quantitatives et qualitatives fort utiles pour le management environnemental du système étudié, à savoir, l'utilisation de combustibles de substitution dans l'industrie cimentière.

CHAPITRE II. OBJECTIFS

Ce travail de fin d'études poursuit essentiellement trois objectifs. Le premier est d'établir des bilans de matière et d'énergie de cimenteries soumises à différents taux d'utilisation de combustibles de substitution. Le second est d'y appliquer la méthodologie LCA et de déterminer les contributions respectives des différents sous-systèmes (extraction des matières premières, clinkérisation, mouture) à la charge environnementale. Le troisième et dernier objectif est de comparer les systèmes envisagés et d'en tirer les conclusions utiles quant à l'utilisation des déchets comme combustibles de substitution en cimenterie.

Nous allons expliciter un peu plus longuement le premier objectif, à savoir l'établissement de bilans de matière et d'énergie pour des cimenteries utilisant des taux de substitution variables en ce qui concerne les combustibles fossiles.

- Notre premier système se basera sur une usine de la région Wallonne : CBR Lixhe. Cette dernière utilise les combustibles de substitution en grande proportion pour satisfaire les besoins énergétiques requis par la clinkérisation.
- Le deuxième système sera modélisé de telle sorte à obtenir une cimenterie utilisant uniquement des combustibles fossiles. Les données se baseront sur le document BREF (Best REferences) du Ciment et de la Chaux. Il ne s'agira pas d'une usine existant réellement mais qui pourrait probablement exister en Europe.
- Le troisième système se basera sur la base de données Ciment de Portland du logiciel SimaPro7.1, ce dernier utilisant des combustibles de substitution mais de façon moindre que dans le premier système.

L'utilisation du troisième système aura également comme but de comparer les données fournies par un logiciel à la réalité belge actuelle en ce qui concerne le domaine cimentier.

Pour atteindre les objectifs, ce travail doit comporter les étapes suivantes :

- Obtenir les données techniques aussi complètes et précises que possible se rapportant à l'évaluation environnementale précitée.
- Définir et modéliser les différents systèmes (hypothèses différentes) afin d'estimer les flux de matière et d'énergie (bilan des intrants et des sortants).
- Utiliser la méthode LCA pour évaluer l'impact environnemental. Il s'agit notamment d'utiliser les scores caractérisés, normalisés et pondérés selon la méthode Eco-Indicator 99 qui répartit les dommages entre 3 catégories : « Santé humaine », « Qualité de l'écosystème », « Ressources ».
- Discuter les résultats : comparaison des charges environnementales associées aux étapes du cycle et selon les différents systèmes envisagés et analyse de sensibilité (variations des scores en fonction de certains paramètres).

CHAPITRE III. LA PRODUCTION DU CIMENT, GENERALITES

III.1. Définition du ciment

Le ciment est un liant hydraulique se présentant sous la forme d'une poudre très fine, non-métallique et inorganique. Lorsqu'il y a ajout d'eau, il forme une pâte liante plus ou moins fluide qui durcit tant sous eau que dans l'air grâce à l'agglomération des matières inertes solides. Cette propriété est due à la formation d'hydrates de silicate de calcium résultant de la réaction de mélange de l'eau avec les constituants du ciment. [30]

III.2. Etapes de fabrication du ciment

La fabrication du ciment comporte deux étapes essentielles. La première consiste en la formation du clinker après calcination et clinkérisation des matières premières à haute température. La seconde aura pour but la fabrication du ciment à proprement parler comprenant le broyage du clinker et du gypse et/ou des autres additifs nécessaires à l'obtention du type de ciment désiré.

III.2.1. Calcination et clinkérisation

Le procédé de fabrication du ciment commence avec la décarbonatation du carbonate de calcium (CaCO_3) aux alentours de 900°C ce qui libère de l'oxyde de calcium (CaO) ainsi que du dioxyde de carbone (CO_2). Cette étape est appelée calcination.



Équation 1 Décarbonatation

L'étape suivante consiste en la clinkérisation au cours de laquelle l'oxyde de calcium réagit à haute température ($1450\text{-}1500^\circ\text{C}$) avec de la silice, de l'alumine et des oxydes ferreux pour former des silicates, aluminates ou ferrites de calcium. Ces quatre composés doivent être dosés judicieusement. Une fois combinés à haute température, ils constituent le clinker. [12]

Caractéristiques et propriétés du clinker [3], [50]

Lors des différentes réactions qui vont être évoquées tout au long de ce paragraphe, nous utiliserons la nomenclature propre à la cimenterie à savoir

C	CaO
S	SiO_2
A	Al_2O_3
F	Fe_2O_3

Tableau III.1 Nomenclature utilisée en cimenterie

Lors de la formation du clinker, après la calcination, les oxydes principaux, repris dans le Tableau III.1, vont se combiner pour former d'autres minéraux. Sous l'effet de la température, plusieurs réactions vont avoir lieu :

- L'oxyde de fer se combine à l'oxyde d'aluminium et à l'oxyde de calcium pour former l'aluminoferrite tétracalcite (C_4AF).
- L'alumine restante réagit avec l'oxyde de calcium pour former l'aluminate tricalcique (C_3A).
Le C_4AF et le C_3A forment la phase liquide.
- Les oxydes de silicium et de calcium réagissent ensemble pour former le silicate bicalcique (C_2S).
- Le silicate bicalcique (C_2S) va se transformer en silicate tricalcique (C_3S) tant qu'il reste de l'oxyde de calcium non combiné.

D'autres composés peuvent également être présents et subir des transformations :

- La magnésie ne réagit pas avec les autres constituants.
- Les alcalis et les sulfates peuvent réagir entre eux et former des sulfates alcalins ou encore réagir avec l'aluminate tricalcique (C_3A) pour obtenir des cristaux d'alcali aluminate.

Une variation des constituants principaux ou des éléments mineurs secondaires entraîne des modifications quant à l'aptitude à la cuisson du mélange cru et également en ce qui concerne les caractéristiques hydrauliques du produit fini.

En pratique, la proportion des principaux constituants du clinker se retrouvent sous forme de rapport ou encore d'indices chimiques ou de modules à satisfaire afin d'obtenir des propriétés déterminées. Ils sont basés sur des études se rapportant au mécanisme de formation du clinker.

- Module hydraulique de Michaelis

$$HM = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Ce module est compris entre 1,7 et 3. Les composés sont exprimés en termes de pourcentage.

- Module silicique de Kühl

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Il est compris entre 1,5 et 5. Les composés sont exprimés en termes de pourcentage.

- Module aluminoferrique de Kühl

$$TM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Il est compris entre 1,5 et 2,5. Les composés sont exprimés en termes de pourcentage.

- Facteur de saturation de Lea Parker

$$LSI = \frac{CaO}{2,8 \times SiO_2 + 1,18 \times Al_2O_3 + 0,65 \times Fe_2O_3}$$

Il est compris entre 0,85 et 1. Ce facteur représente le rapport entre la quantité de chaux présente et celle qui peut être liée dans le clinker. Il permet donc de connaître le comportement à la cuisson et de prévoir la qualité du ciment.

Ces différents modules vont instaurer des plages de variation de composition du clinker acceptables pour obtenir une qualité suffisante. Le Tableau III.2 montre les inconvénients rencontrés lors d'une variation trop grande de la composition.

Facteur utilisé	Minimum acceptable	Maximum acceptable	Si \leq minimum	Si \geq maximum
Module Hydraulique	1,5	2,5	Résistances initiales faibles	Gonflement
Module Silicique	1,5	3,5	Diminution de la température de clinkérisation Prise et durcissement rapide Favorise le croûtage	Cuisson difficile par manque de fondant Prise lente Diminution du croûtage dans le four
Module Aluminoferrique	1,5	2,5	Faible chaleur d'hydratation Ciment sans C_3A	Prise rapide Ciment alumineux
Facteur de saturation	0,85	0,95	Faible dégagement de chaleur	Résistances initiales élevées Hautes résistances finales

Tableau III.2 Conséquences du changement de composition [50]

Nous ne trouverons pas une formule idéale ou universelle pour le clinker, elle va varier d'une cimenterie à l'autre selon la composition des matières locales et des combustibles utilisés. En général, nous pouvons retenir que les proportions en termes d'oxydes principaux sont celles du Tableau III.3, avec une variation possible de quelques pourcents. Ces chiffres ont été fournis par la société CBR Lixhe. [3]

Constituants principaux	Formule chimique	%
Oxyde de calcium	CaO	67
Silice	SiO ₂	21
Alumine	Al ₂ O ₃	5
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	3

Tableau III.3 Pourcentages approximatifs des oxydes principaux [3]

La teneur en éléments mineurs sera également importante dans le clinker. Ces éléments sont apportés par des sources diverses.

Ils peuvent provenir des matières premières, des combustibles fossiles mais également des combustibles et des matières premières de substitution. Dans le Tableau III.4 ci-dessous, les matières habituellement rencontrées seront présentes mais également des déchets tels que les pneus ou des matières secondaires telles que les cendres volantes.

Nous verrons, par la suite du travail, que ces constatations seront importantes pour le dosage des différentes matières et combustibles présents dans la fabrication d'un clinker de bonne qualité.

Eléments	Sources	Effets sur le clinker
As	Cendres volantes, huiles usées, charbon	Se retrouve dans les poussières et réduit la formation du C_3S , est volatile
Cd	Cendres volantes, peintures	Améliore l'aptitude à la cuisson, est volatile
Co	Cendres volantes, résidus d'huile	Augmente la dureté
Cr	Bauxite, laitier, pneus, charbon	Améliore la broyabilité et a un effet sur la teinte
Cu	Cendres volantes, huiles lubrifiantes, pneus	Réduit la température de fusion
Ni	Cendres volantes, coke de pétrole, pneus, charbon	Il se retrouve dans les poussières vu sa volatilité
Pb	Matières premières, cendres volantes, pneus	Il se retrouve dans les poussières vu sa volatilité
S	Pyrite, laitier, charbon, pneus, coke de pétrole, huiles lubrifiantes	Cycles dans le four, émissions de SO_2 , sulfates alcalins
Zn	Laitier, pneus, huiles usées	Améliore la clinkérisation

Tableau III.4 Effets des éléments mineurs sur le clinker [50]

Nous le voyons bien, les compositions chimiques de tous les intrants d'un four de cimenterie sont importants et doivent être bien maîtrisés afin de permettre le maintien des différents modules dans les fourchettes acceptables.

III.2.2. Les différents procédés de fabrication

Selon l'état des matières premières disponibles, le procédé de mise en œuvre sera différent. Il en existe quatre : le procédé en voie sèche, semi-sèche, semi-humide et humide. Une grande partie du clinker produit dans le monde est basé sur un procédé en voie humide. Malgré cela, en Europe, plus de 75 % de la production utilise le procédé en voie sèche, grâce à l'accès aisé aux matières premières sèches. [12], [14]

Le procédé en voie humide est plus énergivore et donc plus coûteux. Les usines utilisant cette voie, sont généralement celles n'ayant accès qu'à des matières premières humides.

Procédés de fabrication [12], [14]

Dans le procédé en voie sèche, les matières premières sont extraites, broyées et séchées. Elles forment alors le cru qui se présente sous l'aspect d'une poudre fluide. Ce dernier est introduit dans le préchauffeur ou dans le précalcinateur du four, ou plus rarement dans un four tubulaire long.

Dans le procédé en voie semi-sèche, le cru, mélangé à de l'eau, forme des granules qui sont introduites dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.

Dans le procédé en voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau du filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

Dans le procédé à voie humide, les matières premières, dont la teneur en humidité est généralement élevée, sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Celle-ci est ensuite introduite directement dans le four ou peut passer auparavant dans un sécheur.

Les étapes suivantes sont incluses dans tous les procédés, quelle que soit la voie choisie et utilisée :

- Matières premières : stockage et préparation
- Combustibles : stockage et préparation
- Utilisation de déchets comme matières premières et/ou combustibles, exigences de qualité, contrôle et préparation
- Systèmes du four, procédés de mise en route du four et techniques de réduction des émissions
- Produits : stockage et préparation
- Conditionnement et expédition

III.2.3. La mouture

Le ciment est constitué de clinker, de sulfate de calcium (régulateur de prise) et, suivant la qualité, de cendres volantes et/ou de laitier. Le type de ciment à fabriquer détermine le choix du procédé ainsi que celui de l'installation de broyage. L'aptitude au broyage, l'humidité et le comportement à l'abrasion des constituants du type de ciment fabriqué sont des critères tous particulièrement importants.

Les stations de broyage fonctionnent généralement en circuit fermé. Un séparateur opère la sélection des grains selon leur finesse et renvoie la partie insuffisamment fragmentée dans le broyeur.

Les installations de broyage les plus courantes sont :

- Le tube broyeur en circuit fermé
- Le broyeur vertical à galets
- La presse à rouleaux

Le broyeur vertical à galets est adapté aux broyages et séchages simultanés des matières premières du ciment ou du laitier car il peut traiter des matières dont le taux d'humidité est relativement élevé. Son fonctionnement consiste en l'action de 2 à 4 galets montés sur des bras articulés et se déplaçant sur une table ou dans un bol de broyage horizontal. Le temps de passage des matières dans le broyeur est suffisamment court pour éviter la pré-hydratation du clinker.

Le principe de la presse à rouleaux est de laminer la matière entre deux rouleaux tournant en sens opposés, en la soumettant à une pression importante. La presse travaille en circuit

fermé avec un séparateur. Ce système est utilisé sur l'unité de production CBR Lixhe. [12], [14], [3]

III.2.4. Stockage et conditionnement

Après la mouture, et lorsqu'il a acquis les propriétés requises, le ciment est stocké. Afin de rejoindre les silos, des systèmes mécaniques ou pneumatiques peuvent être utilisés. Les premiers possèdent un coût d'investissement plus élevé que les seconds mais des coûts opératoires bien moindres.

Les différents types de ciment sont normalement stockés séparément. Les aires de stockage commencent à être adaptées. En effet, un seul et même silo pourra contenir différents types de ciment.

Les configurations des silos les plus souvent retrouvées sont :

- Un silo comprenant un seul compartiment ainsi qu'une trémie de déchargement
- Un silo comprenant un seul compartiment et un cône central
- Un silo comprenant plusieurs compartiments
- Un silo dôme avec un cône central

Le ciment est généralement un produit local. En effet, vu le coût des transports, le ciment est livré dans un rayon de 200 kilomètres de l'usine. Selon la disposition géographique de cette dernière, le ciment peut être fourni en vrac par camion, par bateau ou par train. Une variante à la livraison en vrac est le conditionnement en sac, en général de 50 kg. Cette opération d'ensachage est très souvent automatisée comme la palettisation qui s'en suit. Ces deux étapes se déroulent sur le site de l'usine si cette dernière possède les installations requises. [12], [14]

CHAPITRE IV. DESCRIPTION DE LA PRODUCTION DU CIMENT POUR LES DIFFERENTS SYSTEMES ENVISAGES

Dans ce travail, nous allons comparer des systèmes conduisant à la production de ciment en utilisant différents taux de substitution des combustibles fossiles. Nous analyserons également leurs répercussions sur l'environnement.

Nous nous baserons en premier lieu sur le fonctionnement de l'usine CBR Lixhe, bien connue en Wallonie et soumise à un permis d'exploitation particulier. Cette dernière emploie des combustibles de substitution.

En deuxième lieu, nous modéliserons une cimenterie qui n'utilise pas de combustibles de substitution et dont les émissions se situent dans la fourchette reprise dans le document BREF Ciment et Chaux datant de 2001.

Pour finir, nous examinerons les données obtenues avec le logiciel SimaPro7.1, base de données regroupant différentes opérations dans la fabrication du ciment et permettant d'obtenir les émissions liées.

IV.1. Fabrication du ciment à CBR Lixhe

IV.1.1. Situation de l'usine

L'industrie de Lixhe est implantée dans la province de Liège, près de Visé, depuis 1950. Sa situation géographique privilégiée lui permet de profiter de réseaux ferroviaire et autoroutier important ainsi qu'un accès au Canal Albert autorisant le transport fluvial.

Jusqu'en 2001, l'industrie cimentière installée à Lixhe, possédait deux fours de clinkérisation : un à voie humide et un autre à voie sèche. Dans le courant de l'année 2000, la société a procédé à des investissements majeurs pour augmenter la capacité de production et le rendement énergétique du four à voie sèche mis en service en 1976. Ceci a alors permis l'arrêt définitif du four à voie humide datant de 1968. Le four à voie sèche a connu une augmentation de production de près de 30 % et est désormais apte à la valorisation de combustibles alternatifs jusqu'à un taux de 60 %, tout en restant conforme aux normes environnementales d'application. [3], [6]

IV.1.2. Etapes de fabrication du ciment

IV.1.2.1. L'extraction des matières premières

CBR Lixhe exploite deux carrières de formation géologique différente.

- La carrière de Loën est située à 600 m de l'usine. Elle alimente cette dernière en limon, craie blanche et craie grise qui après extraction sont concassés et envoyés à l'usine par bande transporteuse.

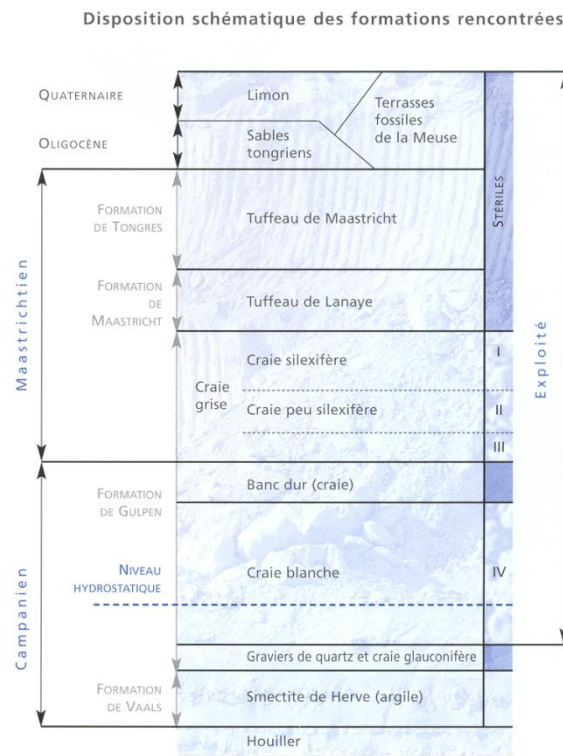


Figure IV.1 Carrière de Loën [3]

- La carrière de Romont a été ouverte en 1974 et elle permet l'alimentation de l'usine en tuffeau. Celui-ci, contenant 16% d'eau, se présente sous la forme d'une roche tendre, friable, pouvant devenir une farine grossière. Le tuffeau est présent dans deux couches géologiques représentées sur la Figure IV.2.

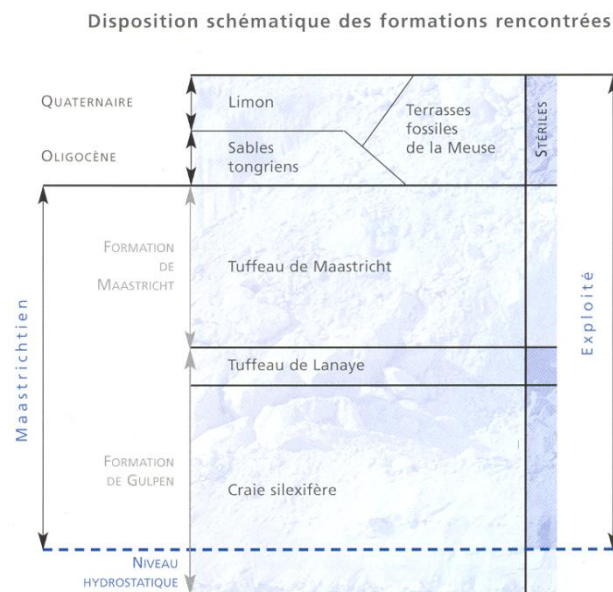


Figure IV.2 Carrière de Romont [3]

Pour des raisons de stabilité du procédé, les deux tuffeaux sont extraits en proportions constantes. Après concassage, le tuffeau est acheminé vers l'usine par une courroie transporteuse de 2200m de long. Cette dernière est logée dans un tunnel en dessous de la vallée du Geer, de manière à préserver l'environnement et diminuer le transport routier.

Afin de préserver le paysage et l'environnement, CBR a développé une politique à long terme des sites d'extraction. Les plans d'exploitation prévus assurent un parallélisme entre l'extraction et la réhabilitation des sites. [3], [6], [46]

IV.1.2.2. Fabrication du clinker

Comme vu au paragraphe III.2.1, le clinker résulte de la combinaison de quatre éléments minéraux majeurs dont la plus grande partie est extraite en carrière. Dans un souci d'économie des matières premières, les composants tels que l'oxyde de fer, la silice et l'alumine vont provenir autant que possible de matières premières secondaires. Ils seront généralement amenés par voie fluviale à l'usine.

CBR Lixhe utilise une installation de clinkérisation à voie sèche, composée d'une tour de préchauffage et d'un four rotatif. Les étapes se déroulant ici sont les mêmes que celles décrites au paragraphe III.2. Nous allons néanmoins les détailler ici avec plus de précision.

La farine, obtenue après broyage des matières premières, séchage et homogénéisation, est introduite au sommet d'une tour de préchauffage composée de cyclones. Pendant sa chute, la farine s'échauffe au contact des gaz chauds, elle atteint alors une température d'environ 800°C. La calcination a lieu avec la déshydratation et la décarbonatation.

La farine pénètre ensuite dans un four rotatif, incliné, chauffé par une flamme d'une température avoisinant les 2000°C qui assure la cuisson et donc la clinkérisation à 1450°C.

Les granules obtenues sont refroidies rapidement à l'air et envoyées au stockage.

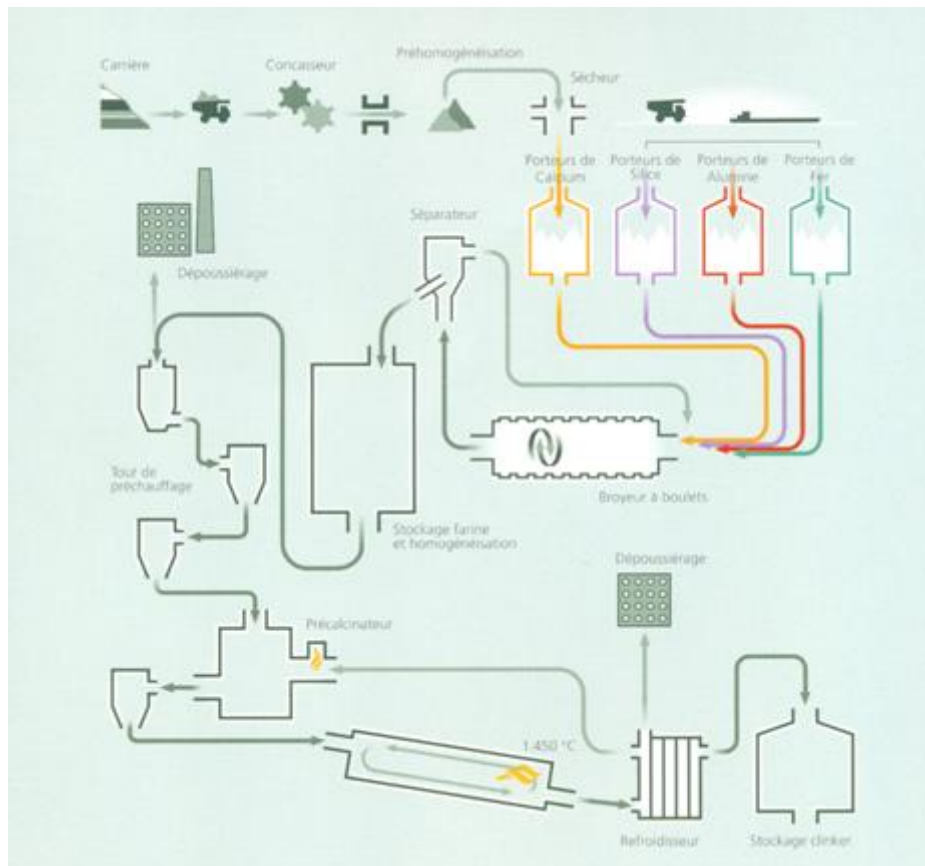


Figure IV.3 Fabrication du clinker [3]

La clinkérisation demande une grande quantité d'énergie thermique. La société a donc décidé de valoriser l'énergie contenue dans des matières secondaires en les utilisant comme combustibles de substitution.

CBR Lixhe valorise le potentiel énergétique de certains déchets depuis de nombreuses années.

- Depuis 1983, le four est alimenté par des pneus usagés de voitures ou de camions. Ces déchets possèdent un très bon pouvoir calorifique et contiennent également des éléments qui peuvent entrer dans la composition du clinker tels que le fer ou la silice.
- Le résoufuel (REconstitued SOLid FUEL) est préparé par un centre spécialisé de prétraitement à partir de résidus combustibles et de matières absorbantes, le plus souvent des sciures de bois. Ce procédé permet la valorisation de matières telles que des résidus de peintures, d'huiles et de solvants usagés.
- La biomasse entre depuis quelques années dans la catégorie des combustibles de substitution. Elle est principalement constituée de farines animales qui, suite à la crise belge dite de la dioxine, ne sont plus intégrées dans la chaîne alimentaire.
- Une installation pilote d'injection de fluff a été démarrée en 2006. Au cours de la première année d'utilisation, ces fins plastiques issus de résidus urbains ont alimenté le four à raison de 2,7 % des besoins calorifiques. CBR Lixhe envisage une consommation croissante de ce combustible dans les années à venir.

Cette valorisation permet une couverture d'une grande partie des besoins énergétiques, elle atteint actuellement un taux de plus de 50%. [3], [6], [46]

Dans ce travail, nous nous baserons sur les taux de substitution évoqués par CBR Lixhe lors de leur rapport environnemental de 2006 et nous nous limiterons aux combustibles de substitution représentant les trois plus grands pourcentages, en termes de mégajoule, à savoir les pneus, les sciures imprégnées et les farines animales.

IV.1.2.3. La mouture

Comme vu au paragraphe III.2.3, le ciment est constitué de clinker et d'additifs. L'usine de CBR Lixhe utilise deux techniques de mouture. [3], [46]

La mouture par broyage

Après dosage, les différents constituants du ciment sont introduits dans un broyeur à boulets. Un séparateur opère la sélection des grains d'après leur finesse et renvoie au broyeur la partie insuffisamment broyée. La finesse du ciment est importante et détermine sa classe de résistance.

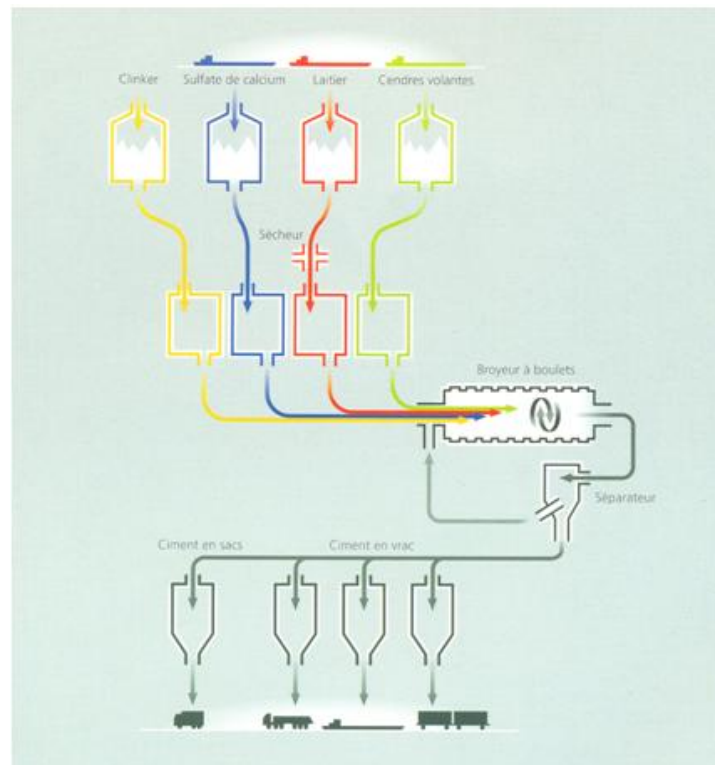


Figure IV.4 Mouture par broyage [3]

La mouture par laminage

En 1955, à Lixhe, a été mise en service une unité de mouture par laminage intégral. Le broyeur à boulets y est remplacé par une presse à rouleaux. La presse lamine la matière entre deux rouleaux tournant en sens opposés en la soumettant à une pression importante. Elle travaille en circuit fermé avec un séparateur haute performance. Ce dernier est traversé par un grand débit d'air qui extrait le ciment fini et l'amène vers un filtre à manches où il est récolté. Les particules n'ayant pas la finesse requise retournent à la presse. [3], [46]

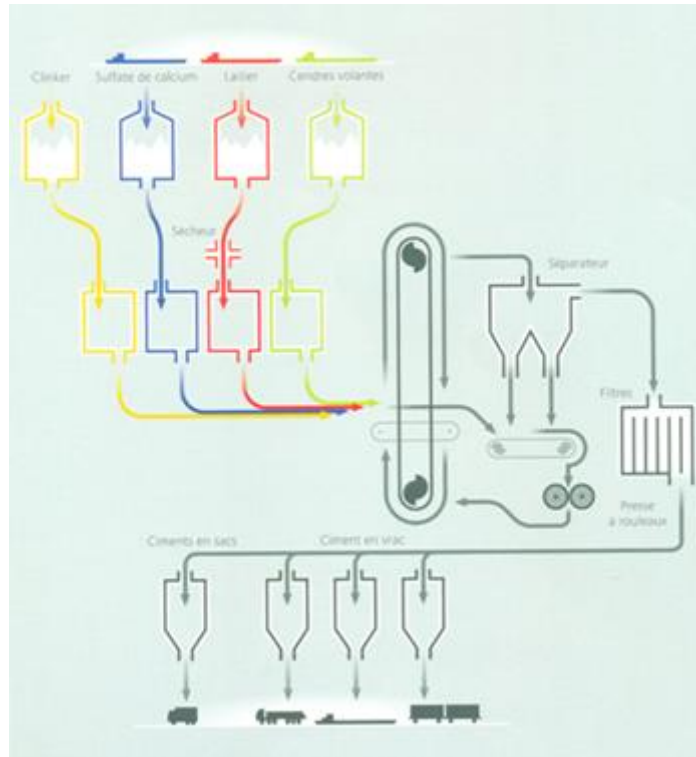


Figure IV.5 Mouture par laminage [3]

Dans ce travail, nous nous baserons sur la fabrication d'un ciment de type Portland avec un pourcentage de clinker atteignant les 79 %, les 21 % restant étant partagés entre l'addition de gypse, de cendres volantes et de laitier de haut fourneau.

IV.1.2.4. Emballage et expédition

La plus grosse partie du ciment produit est transportée en vrac, ce qui représente environ 80 % de la production. L'usine est équipée d'une installation de chargement vrac-camion entièrement automatisée. Les livraisons en vrac peuvent se faire sur des ponts à peser ou par voie fluviale. Cette dernière possibilité est utilisée pour 30 % des transports en vrac, vu l'accès immédiat au canal Albert.

Une partie du ciment est ensachée, elle représente annuellement 300.000 tonnes de ciment de différents types. Le remplissage et le pesage des sacs de 25 ou 50 kg sont des opérations automatiques. L'usine possède également une installation de palettisation et de fardélisation qui empile et calibre les colis. [3], [46]

IV.2. Fabrication du ciment se basant sur les émissions du BREF (Best REferences)

Le BREF est le produit d'échanges d'informations entre groupes TWGs (Technical Working Groups). Ce document, avant d'être avalisé, passe par plusieurs stades, où certains points sont mis en avant. Les BREFs sont en constant processus de révision, ce qui découle du concept dynamique des meilleures techniques disponibles. En général, les documents BREF

sont revus tous les 5 ans. Ils constituent alors des documents de référence des techniques actuellement disponibles en Europe. [42]

Pour ce travail, nous utiliserons les données du BREF 2001, les données du Draft de septembre 2007 serviront pour l'analyse de sensibilité, le document de 2001 étant actuellement en révision.

Les différentes étapes de la fabrication du ciment utilisant le procédé à voie sèche sont reprises au Chapitre III.

Les émissions, suite à la production d'une tonne de clinker, fournies par le BREF représentent une fourchette de valeurs très large, celles-ci dépendant fortement de la nature des matières premières, des combustibles, de l'âge et du design de l'industrie ainsi que des exigences de l'autorité en place.

Définir exactement ici les techniques pour lesquelles nous obtenons les émissions utilisées deviendrait compliqué. En effet, nous utiliserons une moyenne des bornes fixées afin de nous situer dans une moyenne européenne des techniques actuellement utilisées.

Nous détaillerons, à la suite de ce paragraphe, les différentes techniques actuellement disponibles afin de réduire les émissions en amont ou en aval d'un polluant en particulier. Nous nous pencherons sur les techniques relatives aux polluants cités dans la littérature comme posant le plus de problèmes d'un point de vue impact environnemental. Nous pourrions supposer que celles-ci seront dès lors fortement utiles pour atteindre les bornes minimales de ces polluants relatées dans le BREF de 2001. [12], [14]

IV.2.1. Techniques de réduction des polluants

Ce paragraphe énoncera brièvement les techniques actuellement utilisées dans le but de réduire en amont ou en aval les émissions de certains polluants en particulier. Nous n'explicitons que celles utiles à notre étude, à savoir celles se référant aux installations fixes. Un mot d'explication sera donné pour chaque technique mais nous n'entrerons pas dans les détails, l'objet du travail n'étant pas là. Ces techniques seront alors à mettre en relation avec le Chapitre VII relatif aux résultats, afin de réduire les polluants ayant l'impact le plus grand sur l'environnement, et permettre au système d'être amélioré. [12], [25]

IV.2.1.1. Réduction des NO_x

Avant de parler des techniques de réduction à proprement parler, nous allons faire un bref rappel de la formation de ces composés. Ce dernier nous permettra de comprendre plus facilement les paramètres à faire varier afin de réduire ces émissions.

Formation des NO_x

La combustion produira 3 oxydes majeurs, à savoir l'oxyde nitrique (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) et l'oxyde nitreux (N₂O). Les deux premiers sont très réactifs tandis que le dernier est très stable, il peut rester près de 125 ans dans l'atmosphère. Le dioxyde d'azote, est quant à lui, la fraction principale du NO_x troposphérique.

Ils peuvent tous les trois être produits de deux façons, à savoir, de façon naturelle par l'activité microbienne des sols et des océans ou de façon anthropique par la combustion des combustibles fossiles ou de la biomasse.

Lors d'une combustion, il y aura deux sources permettant la formation de NO_x , il s'agit de l'oxydation de l'azote atmosphérique et celle des composés nitrés du combustible.

Les mécanismes de production du NO, qui pourra par la suite s'oxyder en NO_2 , dépendent de certaines conditions :

Si le combustible ne contient pas de composés nitrés,

- lors de mélanges stœchiométriques ou pauvres en oxygène, il y aura production de NO par oxydation de l'azote de l'air selon le mécanisme thermique de Zeldovich
- lors de mélanges riches, la production de NO se fera selon le mécanisme de Fenimore ou encore appelé mécanisme prompt.

Si le combustible contient des composés nitrés, l'oxydation des atomes d'azote du combustible amènera à la production de NO.

Le NO formé par ces différentes étapes, selon les conditions de combustion, peut rencontrer des radicaux hydrocarbonés pour former des cyanures, des radicaux aminés pour former de l'azote élémentaire ou des espèces contenant de l'oxygène pour former du NO_2 .

Technique de réduction des NO_x

Le but de ces techniques sera de réduire la production de NO thermique qui est majoritaire dans les flammes d'installations fixes fonctionnant avec un excès d'air. Il existe deux moyens de réduire cette production à savoir une réduction de la température maximale dans la flamme et une réduction de la concentration en oxygène, surtout dans les zones où la température est élevée.

Les mesures suivantes sont appelées mesures primaires :

- Le refroidissement de flamme consiste en l'injection d'eau au combustible ou directement dans la flamme. L'utilisation de déchets avec une forte teneur en eau permet également de réduire la température. La production de NO est réduite par la diminution de la concentration en oxygène et de la température, dues toutes les deux à la dilution, ainsi que par la réduction supplémentaire de la température entraînée par la vaporisation de l'eau. Cette méthode est utilisable pour tous les types de four mais pourrait par contre engendrer une perte d'efficacité du procédé ainsi que de mener à une qualité moindre du clinker.
- Les brûleurs à bas NO_x sont des brûleurs à combustion indirecte, où l'air et le combustible sont injectés dans le four par des tubes concentriques. Leur particularité essentielle est de produire une ignition très rapide des composés volatils des combustibles, dans une atmosphère pauvre en oxygène. Cette méthode peut être adaptée à tous les types de four rotatif. Néanmoins, il se peut que l'installation de ces brûleurs n'entraîne pas une diminution notable des NO_x .
- La combustion étagée s'applique à des fours de cimenterie ayant un précalcinateur spécifique. Le premier stade de combustion a lieu dans le four rotatif sous des conditions optimales pour le procédé de clinkérisation. La deuxième étape consiste en un brûleur qui fournit une atmosphère réductrice, ce qui décompose une partie des oxydes d'azote préalablement produits. La haute température régnant dans cette zone est favorable à la réaction de reconversion des oxydes d'azote en azote

élémentaire. Au troisième stade, le combustible est introduit au niveau du calcinateur avec de l'air, ceci produisant à nouveau une atmosphère réductrice. Le système réduit la formation de NO_x à partir du combustible et également à la sortie du four. Dans le quatrième stade, l'air restant est alimenté dans le système.

Cette méthode peut augmenter les émissions de CO et de SO_2 si la combustion n'est pas complète dans le précalcinateur.

- Une autre méthode consiste en la création de zones de réduction par des combustibles en morceaux dans des fours longs à voie sèche ou à voie humide. Bien que les fours longs n'aient généralement pas accès à une zone de température entre 900 et 1000°C, ces systèmes ont été installés en vue d'utiliser certains combustibles qui ne passaient pas par le brûleur principal, comme les pneus.

Cette méthode peut être employée dans des fours rotatifs.

- Les additions de minéraux, comme le fluor, aux matières premières vont permettre d'ajuster la qualité du clinker et de réduire la température dans la zone d'agglomération.

Cette technique peut être appliquée dans les fours rotatifs, et elle diminuera la quantité d'énergie requise mais, par l'apport du fluor, elle pourra provoquer une augmentation des émissions d'acide fluorique (HF).

- L'optimisation du procédé (des mesures de contrôle, une homogénéisation des combustibles, des niveaux d'oxygène optimums, etc.) permet de diminuer les émissions de NO_x .
- Le captage des NO_x par SNCR (Selective Non Catalytic Reduction) consiste en une réduction partielle des NO_x en azote élémentaire par réaction thermique avec des composés chimiques réducteurs comme l'ammoniac et l'urée. Une solution d'ammoniac ou d'urée est alors injectée dans les gaz de combustion de manière à obtenir la réaction de réduction évoquée. Le temps de rétention doit être suffisant pour permettre aux agents de réagir avec les NO. La zone de température idéale est de 830°C à 1050°C. Dans cette zone, la réaction sera très rapide. Si la température est trop basse, l'agent réducteur ne réagit pas assez et se retrouve dans les fumées, c'est ce qu'on appelle « amonia ou urea 'slip' » et si la température est trop élevée, il y aura production nette de NO.

Cette méthode est applicable dans des fours rotatifs. Dans les procédés à voie sèche ou à voie humide, dans des fours longs, il est difficile d'obtenir la bonne température et le temps de rétention nécessaire. Il est également important de contrôler l'émission des agents réducteurs n'ayant pas réagi. Il peut donc y avoir des émissions à la cheminée mais également des problèmes dans des appareils en aval de la chambre de combustion par obstruction, due à des nitrates et des sulfates d'ammonium formés.

Nous allons maintenant évoquer une technique agissant comme mesure secondaire. Elle concerne l'épuration des fumées.

- La dénitrification ou SCR (Réduction Catalytique Sélective des NO_x) consiste en l'injection d'ammoniac dans les fumées en présence d'un catalyseur en vue de réduire les NO_x en N_2 et H_2O . Selon le catalyseur utilisé, la plage de température optimale va varier. Cette technique utilise des vitesses faibles pour le passage des gaz afin de limiter les pertes de charge et le phénomène d'érosion, ce qui entraîne le besoin d'installations de grande taille. Cette technique est alors difficilement

implantable sur des installations déjà existantes. De plus, l'unité SCR doit se trouver à un endroit où la température est en accord avec le catalyseur.

En cimenterie, il y aura deux configurations possibles, à savoir la High Dust et la Low Dust qui se distingueront par la place occupée par l'unité SCR. La configuration High Dust est considérée préférable pour des raisons économiques et techniques. En effet, la température des gaz à la sortie du préchauffeur est généralement bonne pour aller dans l'unité SCR tandis que lors de la configuration Low Dust, les gaz ont besoin d'être réchauffés après le dépoussiérage ce qui entraînera une augmentation des coûts et de l'énergie nécessaire.

Les rendements de cette méthode sont plus élevés qu'en SNCR, mais les investissements et les frais opératoires le sont également.

Les mesures secondaires sont évidemment appliquées lorsque les mesures primaires ne suffisent pas ou sont inapplicables.

IV.2.1.2. Réduction des SO_x

Formation des SO_x

La combustion produira deux oxydes majeurs à savoir le dioxyde de soufre (SO₂) et le trioxyde de soufre (SO₃). Ce dernier est obtenu par l'oxydation de SO₂ par l'oxygène et forme de l'acide sulfurique (H₂SO₄) au contact de l'eau. Nous ne trouverons donc pas cette forme (SO₃) dans l'air humide.

Comme pour les composés azotés, les composés soufrés peuvent être produits de façon naturelle (activité volcanique, activité biologique terrestre, production par phytoplancton à la surface des océans ou sprays émis par la mer) ou de façon anthropique (combustion des combustibles fossiles ou activités industrielles comme le grillage de pyrite ou la synthèse d'acide sulfurique).

Lors de la combustion, la formation de SO_x se produira suite à l'oxydation du soufre présent dans les combustibles fossiles. En général, tout le soufre présent est transformé en SO_x et, pour les charbons avec une part importante de pyrite, une partie du soufre se retrouve dans les cendres sous forme de sulfates.

Le mécanisme de formation du SO₂ n'est pas totalement élucidé mais un consensus général a été adopté. La réaction est supposée se produire par étapes très rapides à une vitesse similaire à la combustion. La réaction de transformation du SO₂ en SO₃ est soumise à un équilibre. Le SO₂ sera exclusivement présent à la température de flamme, tandis que le SO₃ sera majoritaire à la température d'émission des fumées.

Techniques de réduction des SO_x

La première méthode de réduction des SO_x consiste en l'épuration des combustibles avant combustion. Elle a surtout trait à l'utilisation du charbon comme combustible fossile. Il existe trois méthodes de désulfuration du charbon : physique, chimique et biochimique.

En cimenterie, le choix des matières premières et des combustibles fossiles selon leur composition permettra déjà de limiter les émissions de SO_x. En général, les techniques employées sont utilisées pour la réduction de l'émission des polluants pendant la combustion, ce sont des mesures primaires.

- L'utilisation d'absorbants comme le calcaire permet de capter les SO_x dans les gaz de combustion. Cet additif présente l'avantage de pouvoir incorporer les produits de la réaction pendant le procédé de clinkérisation. La zone de température optimale pour l'addition de sorbants est de 350 à 400°C ou inférieure à 150°C si le gaz est enrichi à l'eau.

Les techniques peuvent également s'appliquer à la réduction en aval, à savoir l'épuration des fumées. Ce sont des mesures secondaires.

- La technique la plus courante pour la désulfuration des gaz, en ce qui concerne les installations utilisant du charbon, est basée sur la réaction suivante



Équation 2 Désulfuration des gaz

Les SO_x sont absorbés par un liquide ou un slurry injecté dans une tour. Ce système peut également réduire significativement les émissions de HCl, de poussières ainsi que dans une moindre mesure les émissions de métaux et d'ammoniac.

Cette méthode permettra le remplacement du gypse naturel par du gypse résiduaire.

- L'utilisation de charbon actif peut permettre le captage du SO₂ mais également des composés organiques, des métaux, de l'ammoniac, de l'acide chlorhydrique ou fluorique, etc.

Les déchets résultant de cette méthode doivent être considérés comme déchets dangereux et être traités en conséquence.

IV.2.1.3. Réduction des dioxines et furanes

Les émissions de dioxines et de furanes ne peuvent normalement pas dépasser 0,1 ng/Nm³. Pour ce faire, les mesures primaires les plus importantes pour minimiser la possibilité de formation de ces composés sont les suivantes :

- Refroidir rapidement les gaz de sortie du four jusqu'à une température inférieure à 200°C dans les fours longs à voie sèche ou à voie humide sans préchauffeur.
- Limiter ou éviter l'utilisation de déchets comme matière première si ces derniers sont composés de matières organiques.
- Ne pas utiliser des combustibles de substitution lors du démarrage ou de l'arrêt des installations.
- Contrôler et stabiliser les paramètres critiques comme l'homogénéité des matières et des combustibles, réguler l'excès d'oxygène, etc.

Si malgré toutes ces précautions, le taux d'émission était trop élevé, l'adsorption sur charbon actif pourrait être envisagée.

IV.2.1.4. Réduction des métaux

Afin de réduire les émissions en métaux, il faut éviter les matières premières à forte teneur en métaux volatils.

Lors de fortes émissions de métaux volatils, une technique possible reste l'adsorption sur charbon actif. Les éléments métalliques non-volatils vont rester dans le four et être intégrés au clinker. Les éléments semi-volatils, quant à eux, vont être captés également mais dans une moindre mesure que les éléments non-volatils.

IV.2.1.5. Réduction des poussières

Dans une cimenterie, il y a trois sources principales d'émissions de poussières : le four, le refroidissement du clinker et la mouture du ciment.

Les principales techniques utilisées pour réduire les émissions de poussières sont les filtres électrostatiques et les filtres en tissus.

- Les filtres électrostatiques génèrent un champ électrique dans lequel, les particules se trouvant dans l'air, se chargent négativement, et migrent vers les plaques chargées positivement servant au ramassage des poussières. Ces plaques vibrent périodiquement, permettant alors à la matière de se détacher et de tomber plus bas. Cette technique peut être utilisée sous haute température et haute humidité.
- Les filtres en tissus utilisent une membrane perméable aux gaz mais qui retient les poussières. Ces dernières sont déposées à la surface et dans la profondeur du filtre. Plus la couche de poussières augmente, plus la résistance au passage du gaz est forte. Ces filtres doivent être nettoyés régulièrement afin de contrôler la pression du gaz. Le nettoyage peut s'effectuer par flux d'air, vibration, secousse mécanique et envoi d'air comprimé. Ces filtres sont composés de compartiments qui peuvent aisément être isolés en cas de problèmes.

IV.3.Fabrication du ciment suivant la base de données du logiciel SimaPro7.1

Le logiciel SimaPro7.1 constitue un outil professionnel pour collecter, analyser et suivre les performances environnementales de produits ou de services. Il permet également de modéliser et d'analyser des cycles de vie complexes avec un cheminement simple et transparent, comme le prévoient les recommandations ISO 14040. [7]

Lors de ce scénario, nous avons utilisé la base de données Ciment de Portland du logiciel. Celle-ci fournit des données moyennes se basant sur 8 cimenteries suisses. Le ciment pris en compte par la base de données SimaPro7.1 est un ciment de type Portland qui représente 50 % de la production totale suisse. Il offre une composition comprenant 79 % de clinker, 5 % de gypse et 16 % de substances additionnées lors du broyage.

Nous n'avons pas ici connaissance de tous les détails de fabrication du ciment contrairement au système concernant CBR Lixhe. En effet, cette base de données regroupe un certain nombre d'opérations mais n'en explique pas tous les détails.

Les étapes mentionnées comme étant prises en compte sont :

- Le broyage et l'homogénéisation des matières
- Les procédés internes (transport, etc.)
- L'infrastructure (les machines spécifiques et l'usine)

Les étapes non prises en compte sont :

- L'administration
- L'emballage

Les additifs entrant en compte lors de la fabrication du ciment et provenant de matières secondaires comme les poussières provenant du four de cimenterie, les cendres volantes, les poussières de silice ou autres ne sont pas comptabilisées dans les émissions. Ce sont des déchets, récupérés et valorisés en cimenterie. Ils n'ont pas été conçus spécialement dans ce but.

Dans cette base de données, rien n'indique comment a été obtenu le clinker. Pour obtenir ces informations, nous nous pencherons sur celle correspondant au clinker. Elle décrit les étapes suivantes que nous supposons également incluses dans la fabrication du ciment reprise ci-dessus.

Les étapes décrites pour la fabrication du clinker sont les suivantes :

- Le procédé entier de fabrication du clinker à savoir l'approvisionnement en matières premières, le broyage et l'homogénéisation ainsi que les opérations ayant lieu dans le four rotatif.
- Les procédés internes (transport, etc.)
- L'infrastructure avec ici seulement la prise en compte du four rotatif et donc de la consommation de matières.
- Les déchets utilisés comme combustibles et matières premières de substitution sont seulement pris en compte en termes de transport jusqu'à l'industrie cimentière ainsi qu'en termes d'émissions obtenues lors de leur combustion.

Le poids énergétique donné à ces déchets est de 1,22 MJ par tonne de clinker, ce qui représente environ de 35 % de substitution en termes de mégajoules. Cette valeur a été obtenue en 1997 d'après l'étude de 8 usines suisses.

Les étapes n'étant pas prises en compte sont :

- L'infrastructure autre que le four rotatif
- L'administration

En résumé, nous obtenons donc ici un ciment avec les caractéristiques suivantes de procédé ou de composition :

- Une utilisation de combustibles de substitution atteignant un taux d'environ 35 %.
- Une composition comprenant 79 % de clinker, 5 % de gypse et 16 % d'autres additifs.

IV.4.Valorisation des déchets

Dans notre société, la gestion et la valorisation des déchets sont des problèmes assez importants. Le but est d'éliminer les déchets en évitant au maximum une mise en décharge. La valorisation en cimenterie ou l'incinération entrent alors en jeu.

La valorisation de déchets en cimenterie devient de plus en plus courante. Nous avons vu que, dans deux des trois systèmes envisagés, les déchets, en quantité plus ou moins importante selon l'hypothèse, peuvent être brûlés dans un four de cimenterie. Ceux-ci peuvent remplacer, par valorisation de leur énergie, une partie des combustibles fossiles nécessaires, ainsi que par leur composition, une partie des matières premières pour la fabrication du clinker. Les cimentiers sont payés pour utiliser ces déchets. Ils sont dès lors fortement intéressés car cette valorisation va permettre de diminuer leur coût de revient

par la réduction de leur consommation en termes de combustibles fossiles et de matières premières. L'utilisation des déchets a également comme conséquence l'application d'un permis d'exploitation plus strict. Les cimentiers doivent alors prendre des mesures pour rester dans les normes autorisées en termes d'émissions.

L'autre méthode évoquée pour valoriser et détruire les déchets est l'incinération. Ils fournissent alors des quantités d'électricité et de chaleur proportionnelles à la quantité brûlée.

Les déchets, selon leur utilisation en cimenterie ou en incinération n'auront pas la même fonction (réduire la consommation de combustibles fossiles ou produire de l'électricité) ni les mêmes émissions dans l'atmosphère.

Dans ce travail, afin de pouvoir comparer des systèmes conduisant aux mêmes résultats, à savoir la production de ciment et la valorisation de déchets, nous devons également modéliser un incinérateur. Cette modélisation utilisera les données du BREF Incinération d'août 2006, document de référence des meilleures techniques disponibles en Europe pour l'incinération.

Les déchets valorisés dans les deux cas, en cimenterie ou en incinération seront supposés de même nature et en même quantité.

CHAPITRE V. METHODOLOGIE LCA

V.1. Définition

Une analyse de cycle de vie (ACV) (ou analyse LCA (« Life Cycle Assessment »)) est une méthodologie qui permet d'évaluer les fardeaux environnementaux dus à un produit, un procédé ou une activité en cours, en identifiant et en quantifiant l'énergie et les matériaux utilisés ainsi que les rejets dans l'environnement. Les impacts potentiels de ces flux sont alors évalués.

La méthode prend en compte la vie entière du produit, du procédé ou de l'activité. La vie d'un produit, d'un procédé ou d'une activité démarre lorsque les matières premières sont extraites du sol. Cette étape est suivie par la fabrication, le transport et l'utilisation. Le cycle se termine avec la gestion des déchets qui comprend le recyclage et les traitements des déchets ultimes.

L'analyse LCA permettra également d'identifier et d'évaluer les opportunités pour améliorer l'environnement. Une telle étude est normalisée au niveau international (ISO 14040 à 14043). [27], [43]



Figure V.1 Schéma général du cycle de vie d'un produit dans une étude LCA

V.2. Applications

Les études LCA ont fait leur apparition depuis le début des années 1970 en Europe et aux Etats-Unis. Leur but est de déterminer, tout d'abord, le plus exactement possible, l'impact environnemental des activités, produits ou processus envisagés. Ensuite, ces études cherchent à minimiser cet impact en proposant des améliorations possibles grâce à l'identification et à la quantification des matériaux utilisés, de l'énergie consommée et des déchets rejetés dans l'environnement. [34]

Une étude LCA demande beaucoup de temps afin de récolter et de traiter les données. Les études complètes offrent une aide précieuse à la décision mais, en pratique, des études simplifiées seront utilisées. [2]

L'évaluation environnementale s'inscrit dans des contextes très variés. La perception des impacts, et son utilité varient considérablement selon le point de vue et les intérêts de tout un chacun. Nous pouvons d'ores et déjà citer les applications suivantes :

- De plus en plus, les consommateurs et les gouvernements accordent une attention importante au caractère agressif ou non vis-à-vis de l'environnement de tout type de produit, procédé ou activité. Les normes ISO 14000 reflètent cet intérêt pour la protection environnementale en imposant sans cesse des améliorations dans les systèmes de management de l'environnement. L'évaluation de l'impact environnemental peut être un outil d'aide efficace à la gestion permettant de concilier le développement économique et industriel avec la préservation de l'environnement. Une étude LCA constitue dès lors un véritable support au développement durable et peut influencer directement la prise de décision au sein d'une entreprise. [47]
- Une étude LCA peut également être considérée comme une justification à priori ou à posteriori d'un choix technologique. Elle peut par exemple justifier le choix d'un procédé de fabrication d'un produit plutôt qu'un autre. [27]
- Une étude LCA peut être utilisée comme base dans l'attribution d'écolabels et dans la réalisation de programmes d'éducation des consommateurs.

V.3. Limitations

Les analyses de cycle de vie ne comptabilisent pas directement des notions non quantifiables telles que l'impact sur le paysage, le bruit, les odeurs et le temps.

Il est malgré tout possible de les évaluer indirectement, en prenant par exemple pour l'odeur, le nombre de personnes dérangées par celle-ci au dessus d'un certain seuil.

L'utilisation des données relatives à ces catégories dépend largement de la qualité et de la quantité des données utilisées pour réaliser l'inventaire. [2]

V.4. Procédure

Selon la norme ISO 14040, l'analyse de cycle de vie doit être composée des 4 étapes suivantes :

- La définition des objectifs et du champ de l'étude
- L'inventaire du cycle de vie
- L'évaluation des impacts sur l'environnement
- L'interprétation des résultats et la recherche d'améliorations

Un résumé des normes ISO/FDIS 14040-14043 est présenté à l'Annexe 1.

V.4.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Toute analyse de cycle de vie commence par la définition des objectifs (applications, buts, public) et du champ de l'étude (délimitation des frontières du ou des systèmes). Les frontières du système déterminent les processus élémentaires qui doivent être inclus.

Les hypothèses formulées tout au long de l'étude ainsi que les limitations de la méthode d'évaluation de l'impact sont énumérées.

L'unité fonctionnelle doit être définie : elle sert de référence et est mesurable. Les intrants et les sortants du système lui sont rapportés. Cela permet de comparer les bilans environnementaux de différentes situations sur base d'un service rendu similaire.

L'origine des données est également une information indispensable pour évaluer leur qualité. [27], [34]

V.4.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

L'inventaire comprendra une description des processus élémentaires ainsi qu'un bilan complet des flux de matière et d'énergie. Nous aurons également la liste des émissions dans l'air, l'eau, les sols et l'utilisation des ressources, mais pas encore des impacts environnementaux.

Ces flux sont ramenés à une unité fonctionnelle préalablement définie. En pratique, une étude LCA est un processus itératif : lors de la progression de l'analyse, les résultats partiels de l'évaluation de l'impact environnemental peuvent servir de guide pour modifier les hypothèses de travail. [27], [2]

V.4.3. Evaluation de l'impact

Cette étape va permettre d'estimer les impacts environnementaux, à partir des données de l'inventaire, sur la Santé humaine, la Qualité de l'écosystème et les Ressources naturelles et de les exprimer de manière compréhensible. Elle comprend diverses étapes :

- Le choix des catégories d'impacts, des indicateurs de catégorie et des modèles
- La classification : elle affecte les différents résultats de l'inventaire (intrants et sortants) du cycle de vie à des catégories d'impacts environnementaux.
- La caractérisation : elle permet d'attribuer à chaque substance un chiffre indicateur spécifique de la catégorie d'impact.
- La normalisation : elle permet d'obtenir l'importance des résultats par rapport à une référence, les chiffres indicateurs sont alors divisés par les chiffres relatifs à un système de référence. Nous obtenons une unité commune et nous pouvons comparer les différentes catégories.
- La pondération : elle évalue l'importance relative des différentes catégories d'impacts. Cette étape n'est pas nécessairement objective ou scientifique, elle est souvent basée sur des choix personnels, éthiques ou politiques. Nous obtenons alors l'éco-score global des produits comparés de manière relativement subjective.

V.4.4. Interprétation des résultats

Les performances des divers systèmes définis précédemment sont comparées. Des possibilités d'améliorations du système visant à réduire l'impact environnemental peuvent être envisagées. Une analyse de sensibilité ou de robustesse peut également être effectuée pour vérifier la validité des résultats. [27]

V.5. Méthode Eco – Indicator 99

Dans ce travail, la méthode Eco-Indicator 99 a été utilisée pour évaluer les impacts environnementaux. Cette méthode a été élaborée par la Société Pré-Consultant sous l'autorité du Ministère Néerlandais du Logement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, en collaboration avec des experts suisses et néerlandais et avec le « National Institute of Public Health and Environment ». Elle permet d'évaluer des indicateurs d'impacts sur base de trois catégories de dommages.

Les hypothèses de la méthode sont les suivantes :

- Toutes les émissions et les utilisations de terres se déroulent en Europe. On estime également que les dommages n'affectent que l'Europe sauf quelques rares exceptions (disparition de la couche d'ozone, gaz à effets de serre, retombées radioactives, etc.).
- La méthode ne prend en compte les émissions que si elles sont émises au moment de l'étude.
- La méthode est basée sur une définition bien spécifique de l'environnement à savoir : « L'environnement est un ensemble de paramètres biologiques, physiques et chimiques influencés par l'homme qui sont essentiels pour un bon fonctionnement de l'homme et de la nature. Ces conditions incluent la Santé humaine, la Qualité de l'écosystème et des Ressources en suffisance. ». [32]

Remarque : cette définition ne prend pas en compte le bien-être humain ou la préservation des héritages culturels.

- Il existe des règles spéciales concernant l'utilisation des sols et des pesticides.
- Les résultats des modèles de dommages doivent être vus comme des résultats marginaux, ils expriment l'augmentation du dommage lors de l'ajout d'une unité fonctionnelle supplémentaire.
- Lorsque la compatibilité avec ISO 14042 est demandée, la dernière étape de pondération n'est pas autorisée si les résultats doivent être utilisés comme des affirmations comparatives révélées au public.

V.5.1. Catégories de dommages

Les dommages sont répartis en trois catégories suivant qu'ils affectent la Santé humaine, la Qualité de l'écosystème ou les Ressources.

La Santé humaine (HH : Human Health)

Elle est définie par l'organisation mondiale de la santé (WHO : World Health Organization) comme étant un état de bien-être complet physique, mental et social et non simplement par l'absence de maladies ou d'infirmités.

La Qualité de l'écosystème (EQ : Ecosystem Quality)

Il peut être défini en termes de flux d'énergie, de matière et d'informations. On dira alors qu'une haute qualité d'écosystème est la condition pour laquelle les flux ne sont pas perturbés de façon notable par les activités de l'homme contrairement à une faible qualité d'écosystème où les flux sont dans ce cas là perturbés par l'activité humaine.

Exprimé d'une autre façon, cela signifie que les espèces vivantes non humaines ne doivent subir aucun changement, ni dans leur population, ni dans leur distribution géographique.

Les Ressources (R : Resources)

Le dommage causé aux ressources est défini par l'augmentation d'énergie nécessaire à leur extraction. Seules les ressources minérales et les combustibles fossiles sont pris en compte.

V.5.2. Modélisation des dommages

V.5.2.1. Santé humaine

Afin de modéliser le dommage relatif à la Santé humaine (HH), il est nécessaire d'utiliser une échelle de mesure de la santé des populations. L'indicateur de santé utilisé sera exprimé en DALY's (« Disability Adjusted Life Years ») et devra prendre en compte plusieurs facteurs : le nombre d'individus souffrant des dommages, le temps de souffrance (YLD : « Years Lived Disabled ») ou la durée de vie perdue (YLL : « Years of Life Lost »), ainsi que la gravité des problèmes de santé.

La catégorie « Santé humaine » sera divisée en différentes sous-catégories reprenant les effets cancérigènes, respiratoires (causés par les substances organiques et inorganiques), les effets causés par les changements climatiques, par les radiations ionisantes et par la disparition de la couche d'ozone. [32], [34]

La procédure utilisée dans la méthode Eco-Indicator 99 pour décrire les effets sur la Santé humaine comporte quatre étapes :

- L'analyse de devenir des polluants (« Fate Analysis ») : elle établit une relation entre une émission (exprimée en masse) et un changement temporaire de concentration.
- L'analyse d'exposition (« Exposure Analysis ») : elle lie un changement de concentration à une dose.
- L'analyse d'effet (« Effect Analysis ») : elle établit une corrélation entre la dose évaluée et les effets sur la santé comme par exemple, le nombre et le type de cancers.
- L'analyse des dommages (« Damage Analysis ») : elle exprime les effets sur la Santé humaine, en unité DALY, en estimant les « Years Lived Disabled » et les « Years of Life Lost ».

V.5.2.2. Qualité de l'écosystème

Comme expliqué précédemment, la Qualité de l'écosystème peut être décrite en termes de flux d'énergie, de matière et d'informations. Ces flux peuvent exister à de multiples niveaux. Les flux d'informations peuvent être décrits au niveau de l'écosystème, des gènes et des espèces. Les flux d'énergie et de matière, quant à eux, peuvent être décrits en termes de production de biomasse. Il apparaît évident ici qu'il est préférable de limiter l'étude à un seul niveau et à une seule description : le niveau des espèces et la description du flux d'informations. La diversité des espèces devient, dans ce cas, une représentation adéquate de la Qualité de l'écosystème. [32], [34]

Tous les groupes d'espèces peuvent être touchés par l'influence anthropogénique. Il est impossible de tous les prendre en compte. Certains ont alors été choisis pour représenter de manière appropriée la Qualité de l'écosystème global.

Cette catégorie n'est donc pas homogène, il faudra dès lors utiliser différents paramètres qui se référeront chacun à un groupe d'espèces. Les deux grandeurs utilisées sont :

- La fraction d'espèces potentiellement affectées (PAF : « Potentially Affected Fraction ») est la fraction des espèces qui est exposée à une concentration supérieure ou égale à une concentration de référence pour laquelle aucun effet n'est observé (NOEC : « Non Observed Effect Concentration »). Plus la concentration est élevée, plus le nombre d'espèces affectées est grand.
- La fraction d'espèces potentiellement disparues (PDF : « Potentially Disappeared Fraction ») est la fraction des espèces qui a une probabilité élevée de ne pas se trouver dans une région du fait des conditions défavorables qui y règnent.

Les dommages causés à cette catégorie sont de trois types.

Ecotoxicité (« Ecotoxicity »)

Le modèle détermine les effets causés par les substances toxiques sur divers organismes aquatiques et terrestres représentatifs de la biodiversité, le résultat est exprimé en PAF.

Acidification et Eutrophisation (« Acidification and Eutrophication »)

Les impacts, exprimés en PDF, sont traités simultanément. Ils rendent compte des variations dans le nombre d'espèces cibles suite à des modifications de concentration de certaines substances.

Utilisation des sols (« Land Use »)

Les effets seront exprimés en PDF. Nous distinguerons les effets locaux ou régionaux causés par l'occupation (« Land Occupation ») ou par la transformation des terrains (« Land Conversion »). Les effets locaux se réfèrent au nombre d'espèces apparaissant sur le sol utilisé ou converti tandis que les effets régionaux se réfèrent aux changements des zones naturelles situées en dehors des terres occupées ou transformées.

Pour évaluer les dommages causés à cette catégorie, deux approches ont été utilisées :

- Les impacts dus à l'écotoxicité et à l'acidification-eutrophisation sont déterminés suivant une procédure semblable à celle utilisée pour la catégorie « Santé humaine » à savoir une analyse de « devenir des polluants », une analyse d'effets, et une analyse de dommages.
- Les impacts liés à l'utilisation et à la transformation des sols sont modélisés à partir de données empiriques tenant compte à la fois du type d'utilisation et de la superficie des sols.

V.5.2.3. Ressources

Lors d'extraction de ressources minérales et de combustibles fossiles, il y a diminution de la disponibilité des ressources, de leur qualité, et par conséquent, augmentation de l'énergie nécessaire pour extraire les ressources restantes. [34], [32]

L'extraction des ressources est modélisée par les deux étapes suivantes :

- Analyse des ressources (« Resource Analysis ») : cette étape peut être considérée comme semblable à la « Fate Analysis » des autres catégories. La relation entre

disponibilité et qualité des ressources y est décrite. La diminution de la disponibilité est modélisée à l'aide de modèles géostatiques.

- **Analyse des dommages (« Damage Analysis »)** : cette étape établit le lien entre la diminution de la concentration et les efforts supplémentaires nécessaires dans le futur pour extraire les ressources. Le concept de « surplus d'énergie » est alors employé pour obtenir une mesure relative du dommage causé par la diminution des ressources fossiles et minérales.

V.5.3. Evaluation des dommages

Cette étape consiste à calculer les scores totaux pour chaque catégorie de dommages et à les sommer après une étape de pondération pour obtenir un score unique. Pour faciliter la comparaison des différentes catégories de dommages et uniformiser les résultats, une normalisation est nécessaire. [32]

V.5.3.1. Normalisation

Les scores des différentes catégories sont divisés par les chiffres relatifs à un système de référence. Nous obtenons alors une unité commune et nous pouvons comparer les différentes catégories entre elles.

V.5.3.2. Pondération

A chaque score des différentes catégories de dommages, un facteur de pondération est appliqué en vue d'évaluer l'impact global du produit, activité ou service. Ces facteurs ne sont pas de nature scientifique mais se basent sur des valeurs sociales. Ces dernières peuvent être déterminées par deux méthodes différentes à savoir l'observation du comportement actuel de la société ou par un questionnaire soumis à un échantillon représentatif de personnes.

Les facteurs de pondération sont établis en fonction de la « Perspective Culturelle » adoptée (cf. paragraphe V.5.4).

	Perspectives		
	Hierarchiste	Individualiste	Egalitaire
Catégorie HH	400	550	300
Catégorie EQ	400	250	500
Catégorie R	200	200	200

Tableau V.1 Facteurs de pondération des différentes perspectives [32]

V.5.3.3. Tableau de synthèse

La Figure V.2 résume les différentes étapes d'une étude LCA réalisée au moyen de la méthode Eco-Indicator 99.

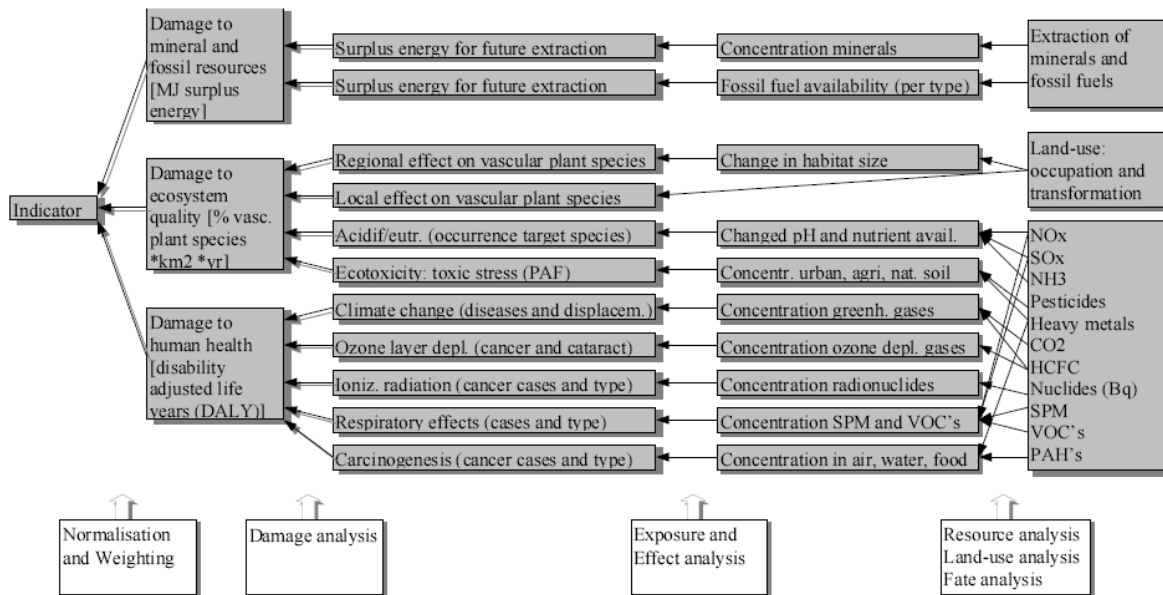


Figure V.2 Etapes d'une étude LCA [32]

V.5.4. Perspective Culturelle

Lors d'une étude LCA, les étapes de modélisation, normalisation et pondération peuvent soulever diverses questions : faut-il inclure ou exclure une substance donnée dans telle ou telle catégorie ? Dans quelle mesure doit-on tenir compte des différents facteurs ? Etc.

Les choix réalisés sont relativement subjectifs. Cette subjectivité peut être modélisée par la notion de « Perspective Culturelle ».

Trois modèles furent envisagés pour traduire l'attitude d'une personne face à une prise de décision.

- La perspective Hiérarchiste : seuls les faits reconnus par les autorités scientifiques et politiques sont inclus dans le modèle.
- La perspective Egalitaire : le principe de précaution est d'application. Toute substance supposée constituer un risque est prise en compte dans ce modèle. Il entraîne une perspective à très long terme et une grande incertitude sur les données.
- La perspective Individualiste : seules les relations de cause à effet prouvées sont incluses dans le modèle. La perspective adoptée est alors à court terme (les effets à long terme pouvant être réduits au vu des avancées de la science et des techniques).

Au vu de ces trois perspectives, trois scores différents peuvent être calculés. Dans les études LCA, la perspective Hiérarchiste est généralement prise en compte car elle fournit un équilibre entre les perspectives à court et à long terme. Les deux autres perspectives sont le plus souvent employées lors d'analyses de robustesse ou de sensibilité. [34]

CHAPITRE VI. APPLICATION DE LA METHODOLOGIE LCA A UN CYCLE DE PRODUCTION DU CIMENT

Ce chapitre va être consacré à la description des diverses étapes réalisées lors de l'application de la méthodologie LCA – Eco-Indicator 99 à des cycles de production du ciment avec utilisation variable de combustibles de substitution. La procédure est normalisée (ISO/FDIS 14040-14043) ; le dernier point de cette procédure à savoir l'interprétation des résultats, fera l'objet du Chapitre VII.

VI.1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude

VI.1.1. Objectif de l'étude

L'étude LCA menée a pour objectif d'évaluer les effets quantifiables de différents systèmes de production du ciment avec un taux d'utilisation de combustibles de substitution dépendant du système envisagé. Elle permettra de comparer les impacts environnementaux des différents sous-systèmes de ces cycles.

VI.1.1.1. Applications prévues

L'étude permettra de déterminer les impacts environnementaux associés aux cycles envisagés pour la production de ciment avec utilisation variable de combustibles de substitution. Elle permettra également de comparer différents systèmes de production existant sur le marché et de s'assurer de la représentativité ou non de la base de données SimaPro7.1 (System for Integrated Environmental Assessment of Products) quant à la production de ciment.

VI.1.1.2. Raisons pour effectuer l'étude

Le ciment est une valeur importante pour notre société, sa production est en constante augmentation. Il devient alors important d'analyser les impacts de cette production sur l'environnement ainsi que de détecter les améliorations possibles tout en préservant la qualité du produit. Il est aussi utile de se rendre compte de l'existence de nombreux systèmes variés produisant du ciment. Ces différents systèmes, selon leurs caractéristiques propres, vont mener à des résultats divers.

VI.1.1.3. Cibles visées

Les cibles de cette étude sont les producteurs de ciment, les autorités compétentes en matière de délivrance de permis d'exploitation et les scientifiques (optimisation des modèles afin de réduire l'impact environnemental).

VI.1.2. Champ de l'étude

VI.1.2.1. Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence

Le champ de l'étude est large : il débute à l'extraction des matières premières et se termine à l'obtention du produit fini en passant par des étapes de clinkérisation, de mouture et de transport des matières premières ainsi que des combustibles fossiles ou de substitution.

L'unité fonctionnelle utilisée dans ce travail est la tonne de ciment, ainsi que la valorisation de 98,95 kg de déchets et la production de 75,65 kWh d'électricité: tous les flux d'énergie ou de matière ont été rapportés à cette unité fonctionnelle.

Ces différents chiffres proviennent de calculs se trouvant à l'Annexe 2. En résumé, d'après les données de CBR Lixhe, il faut 98,95 kg de déchets dans les proportions fournies pour produire 790kg de clinker et donc une tonne de ciment dans les hypothèses adoptées. Si ces mêmes déchets sont incinérés, ils vont fournir 75,65 kWh sur base des données du BREF Incinération.

VI.1.2.2. Frontières des systèmes

Nous allons étudier les trois systèmes, décrits au cours du Chapitre IV, qui posséderont des frontières un peu différentes les unes des autres. Les Figure VI.1,

Figure VI.2,

Figure VI.3 représentent respectivement les systèmes s'adressant à CBR Lixhe, au BREF et à SimaPro7.1. Nous comparerons ces systèmes sur base de trois critères :

- La même quantité de ciment produite
- La même quantité de déchets valorisée ou incinérée
- La même quantité d'électricité produite (kWh)

Le système utilisant les données fournies par CBR Lixhe est composé des étapes, reprises sur la Figure VI.1, nécessaires à la production du ciment. Ce système utilise des déchets comme combustibles de substitution, nous allons donc lui rajouter une centrale électrique. Cette dernière fournira une quantité d'électricité identique à celle qui aurait été obtenue par un incinérateur brûlant la quantité de déchets utilisée comme combustible dans le four de cimenterie.

Les émissions prises en compte proviendront des étapes suivantes :

- L'extraction et le transport des matières premières jusqu'à la cimenterie
- L'extraction et le transport des combustibles fossiles jusqu'à la cimenterie
- Le transport des déchets jusqu'à la cimenterie
- La calcination et la clinkérisation dans le four à voie sèche
- Le transport des additifs jusqu'à la cimenterie
- Le broyage avec sa consommation d'électricité provenant du mixte belge avec nucléaire
- La production d'électricité par le mixte belge avec nucléaire

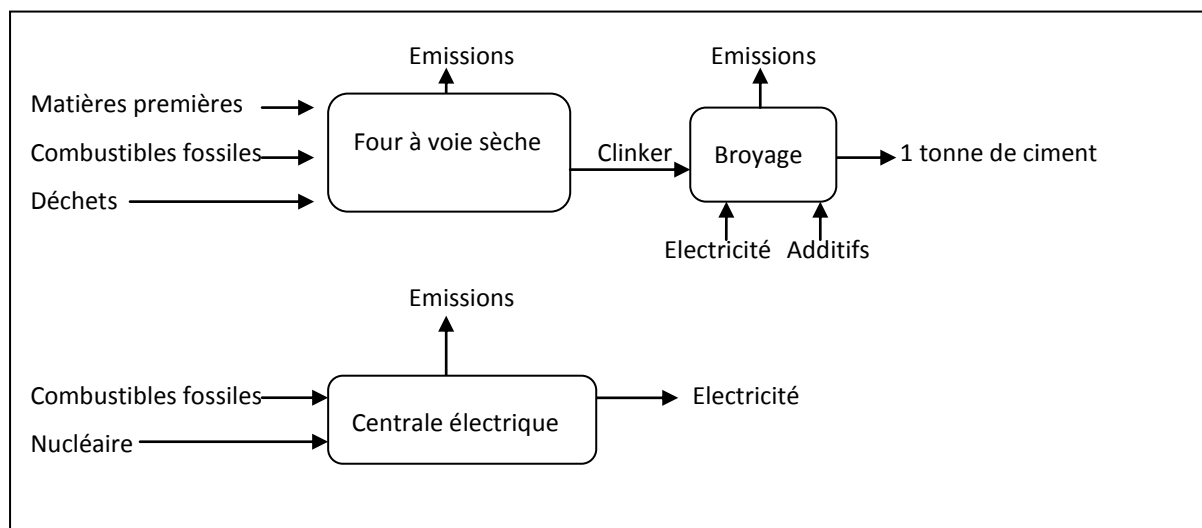


Figure VI.1 Système CBR Lixhe

Le système se basant sur les émissions du BREF utilise uniquement des combustibles fossiles comme source comme source d'énergie. Il comprendra également les étapes nécessaires à la production de ciment reprises sur la ciment reprises sur la

Figure VI.2. Les déchets n'étant pas utilisés dans l'industrie cimentière comme combustible, ces derniers devront être brûlés dans un incinérateur. Nous ajouterons donc dans le système un incinérateur brûlant une quantité de déchets, identique à celle utilisée dans le système CBR, ce qui nous amène donc à une quantité d'électricité également identique mais avec des émissions différentes.

Les émissions prises en compte proviendront des étapes suivantes :

- L'extraction et le transport des matières premières jusqu'à la cimenterie
- L'extraction et le transport des combustibles fossiles jusqu'à la cimenterie
- La calcination et la clinkérisation dans le four à voie sèche
- Le transport des additifs jusqu'à la cimenterie
- Le broyage avec sa consommation d'électricité provenant du mixte belge avec nucléaire
- Le transport des déchets jusqu'à l'incinérateur
- L'incinération

Pour le transport, nous avons considéré la même provenance et la même distance à parcourir que ce soit pour la cimenterie ou l'incinérateur. En effet, nous verrons à la suite du travail que certains déchets proviennent de pays étrangers comme la France ou l'Allemagne. Nous pouvons alors supposer que si ces déchets parcourent les trajets de leur lieu d'origine jusqu'à la cimenterie, cela provient du fait qu'ils n'ont pas de solution de valorisation suffisante dans leur pays, vu la quantité de déchets à éliminer. L'exemple typique est celui

de la France qui connaît actuellement des problèmes de stockage de farines animales et qui se retrouve contrainte à les envoyer dans des cimenteries, même en dehors de leur pays.

L'hypothèse d'un incinérateur à même distance que la cimenterie nous paraît donc approprié vu la conjoncture actuelle en ce qui concerne les déchets utilisés et plus particulièrement les farines animales.

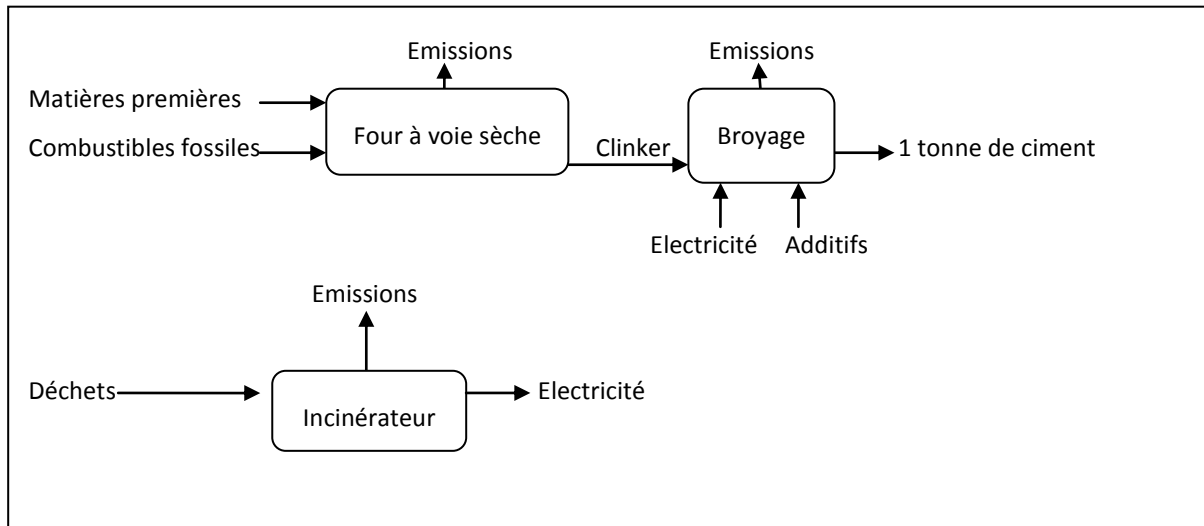


Figure VI.2 Système BREF Charbon

Le troisième et dernier système envisagé est celui utilisant la base de données du logiciel SimaPro7.1. Comme évoqué au paragraphe IV.3, ce système valorise un pourcentage moindre de déchets que dans le système utilisé par CBR Lixhe. Nous allons donc intégrer dans ce système les étapes évoquées dans la base de données à la production de ciment. Pour compléter le système et pouvoir le comparer facilement aux autres, nous allons donc rajouter un incinérateur qui brûlera la quantité de déchets correspondant à la différence entre celle brûlée dans la cimenterie chez CBR et celle brûlée par SimaPro7.1. Nous rajouterons également une centrale électrique pour fournir l'électricité qui aurait été produite par l'incinérateur valorisant la quantité de déchets utilisée en cimenterie.

Les émissions prises en compte proviendront des étapes suivantes :

- La production de ciment selon les hypothèses citées au paragraphe IV.3
- La production d'électricité par le mixte belge avec nucléaire
- Le transport des déchets jusqu'à l'incinérateur
- L'incinération

Pour le transport, nous avons supposé la même hypothèse que pour le système précédent, à savoir que la distance entre l'origine des déchets et la cimenterie est égale à celle reliant la provenance des déchets et l'incinérateur.

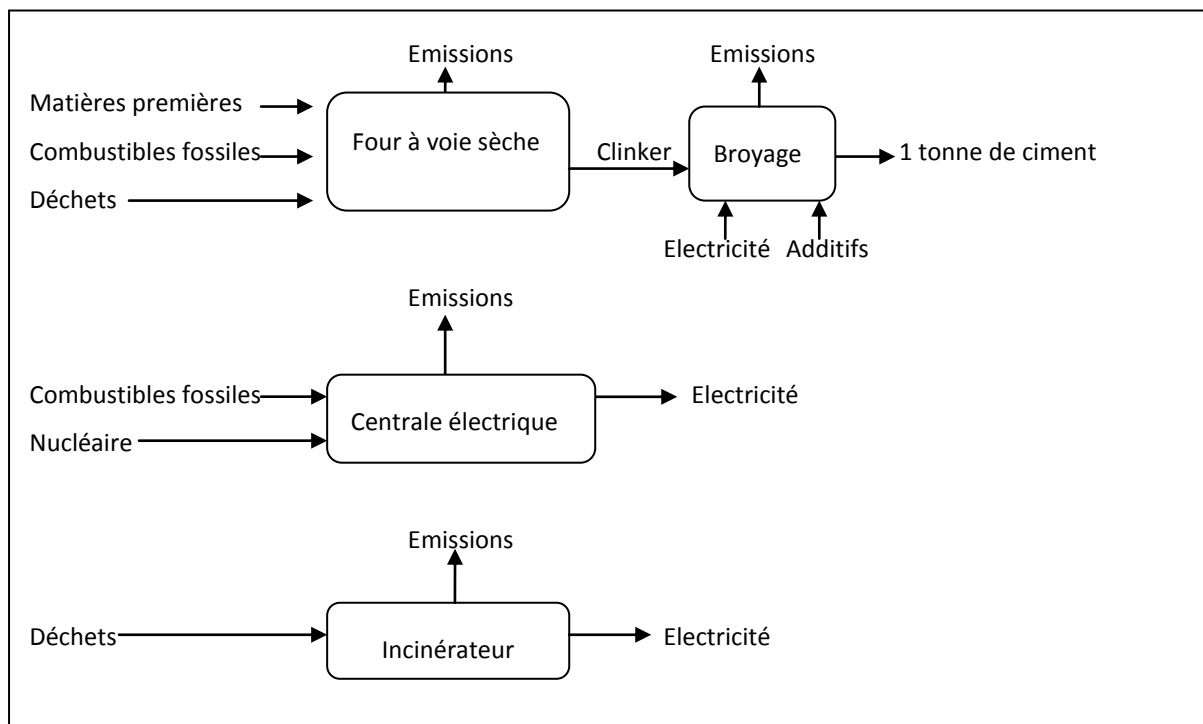


Figure VI.3 Système SimaPro7.1

Dans les trois systèmes précédents, la production des déchets n'est pas prise en compte comme source d'émissions. En effet, nous prenons ici l'hypothèse que ceux-ci n'ont pas été créés dans le but d'être valorisés en cimenterie ou brûlés en incinérateur.

VI.1.2.3. Description des catégories de données

Les données utilisées sont indiquées au Chapitre IV et en Annexe 4, Annexe 5 et Annexe 6 en ce qui concerne les émissions dans l'air pour les systèmes CBR Lixhe et BREF charbon.

VI.1.2.4. Critères pour l'inclusion initiale des intrants et des sortants

L'évaluation de l'impact tient compte des pollutions déjà évoquées plus haut à savoir celles découlant du processus même de fabrication du ciment (extraction, transport, émissions,...).

Les émissions provoquées par la production des déchets n'entrent pas en compte ici, pour les raisons évoquées au point VI.1.2.2.

Les pollutions provoquées par la construction d'une cimenterie, d'un incinérateur ou d'une centrale électrique ne sont également pas comptabilisées. Nous supposons ici les installations déjà en place, et en cours de fonctionnement lors de l'apport des matières premières, combustibles et déchets. Nous négligerons par la même occasion les besoins énergétiques, ou calorifiques pour mettre en route les installations ou les arrêter.

VI.1.2.5. Exigences relatives à la qualité des données

La plupart des données ont été obtenues à partir de société industrielle, de documents officiels ou de bases de données. Nous pouvons donc supposer qu'elles sont fiables et conformes à la réalité.

VI.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

L'utilisation des matières premières et de l'énergie ainsi que les émissions dans l'air, l'eau et le sol sont quantifiées.

VI.2.1. Mode opératoire de recueil des données

Selon le système analysé, nous avons utilisé des sources de données variées à savoir

- Les bases de données du logiciel SimaPro7.1 [7]
- Le BREF Incinération d'août 2006 [13]
- Le BREF Ciment et Chaux de 2001 [12]
- Le Draft du BREF Ciment et Chaux de septembre 2007 [14]
- Les données industrielles fournies par CBR Lixhe [6], [5]

VI.2.1.1. Provenance des données SimaPro7.1

Nous allons utiliser ces données dans les trois systèmes envisagés. Nous allons donc tout d'abord décrire leur provenance. Les données se trouvant dans les bases de données du logiciel fournissent les quantités de matières premières et de combustibles nécessaires ainsi que les émissions dans l'air, l'eau et le sol relatives à la production d'une unité de réactif. Les informations sont triées sur base de critères géographiques, technologiques, etc. Le choix effectué parmi les nombreuses sources d'informations est basé, en général, sur la meilleure technique disponible ou sur une technologie de performances moyennes et couramment utilisée en Europe. [7], [47]

VI.2.1.2. Système CBR Lixhe et production d'électricité

Les informations quantitatives relatives aux flux d'intrants (matières premières, combustibles fossiles, combustibles de substitution,...) du premier système concernant la société CBR Lixhe ont été fournies par la société elle-même. Les distances à prendre en compte pour les transports en ce qui concerne les déchets, les matières premières et les additifs ont également été fournies par la société CBR Lixhe. La quantité de clinker choisie pour la production du ciment a été donnée par la base de données Ciment de Portland du logiciel SimaPro7.1 afin de pouvoir comparer les trois systèmes. Le pourcentage de clinker choisi dans le ciment est tout à fait compatible avec les produits fournis par l'usine CBR Lixhe. Cette hypothèse ne posera donc pas de problème point de vue représentabilité.

Les émissions de polluants dans l'air, l'eau et le sol ainsi que les consommations nécessaires aux extractions des matières premières et combustibles ont pour la plupart été fournies par les bases de données du logiciel SimaPro7.1. Les émissions du four à voie sèche ont été obtenues par la société CBR Lixhe et se trouvent à l'Annexe 4.

Pour compléter le système, en plus de la cimenterie, nous considérerons une centrale électrique utilisant le mixte belge avec nucléaire. La quantité d'électricité à produire est celle décrite dans l'unité fonctionnelle, et dont le calcul est explicité à l'Annexe 2.

VI.2.1.3. Système basé sur le BREF et incinération des déchets

Pour le deuxième système, se basant sur les émissions du BREF, nous avons envisagé la même recette de fabrication du ciment que celle utilisée lors du premier système, mais cette fois-ci en utilisant uniquement des combustibles fossiles à savoir du charbon et du gaz naturel, et non des déchets. Nous nous baserons ici encore sur les données obtenues par la société CBR en ce qui concerne la quantité des matières premières et les distances à prendre en compte pour les transports.

Les émissions des polluants sont également ici, pour la plupart obtenues par les bases de données du logiciel SimaPro7.1. Les émissions du four sont fournies par le BREF Ciment et Chaux de 2001 et se trouvent à l'Annexe 5.

En complément, nous avons dans le système un incinérateur. Les flux intrants se basent sur la quantité de déchets à incinérer, fournie par le même calcul que pour l'unité fonctionnelle qui se trouve à l'Annexe 2. Les émissions seront données par le BREF Incinération d'août 2006 et se trouvent à l'Annexe 6.

VI.2.1.4. Système SimaPro7.1 complété d'un incinérateur et d'une centrale électrique

Pour le troisième système, les flux d'intrants ainsi que les émissions auront été fixés par la base de données SimaPro7.1.

A ce système, nous rajouterons une centrale électrique ainsi qu'un incinérateur. Les flux intrants de chaque installation seront calculés sur base des données fournies par SimaPro7.1, ainsi que sur le BREF Incinération. Le calcul de ces flux se trouve à l'Annexe 3.

VI.2.2. Description qualitative et quantitative des processus élémentaires

La description qualitative des différents systèmes a été vue lors du Chapitre IV. Pour chacun d'entre eux, nous allons désormais quantifier les différents flux intrants et sortants.

VI.2.2.1. Système CBR Lixhe

Les données se basent sur le rapport environnemental de 2006. Les chiffres de 2007 ont légèrement changé en ce qui concerne la quantité de déchets utilisée, mais nous ne possédions pas toutes les données nécessaires, à savoir les émissions des différents polluants datant de 2007 pour effectuer cette étude. Nous avons donc utilisé celles datant de 2006 dans lesquelles nous trouvions tout ce dont nous avons besoin.

Pour fabriquer une tonne de clinker, il faut environ 1,54 t de matières premières. Vu la composition choisie de notre ciment, en plus des 790 kg de clinker, il nous faudra 210 kg d'additifs pour fabriquer notre tonne de ciment. Nous aurons donc besoin des matières premières ou de récupération réparties selon le pourcentage massique suivant pour l'usine CBR Lixhe :

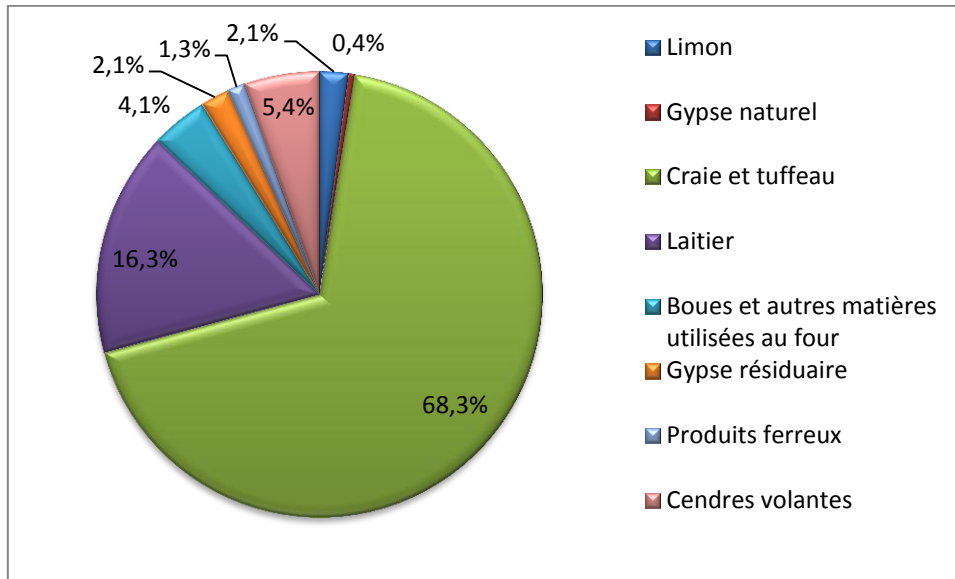


Figure VI.4 Pourcentages massiques en matières premières et additifs pour une tonne de ciment

Cette répartition n'a pas été choisie au hasard, elle peut être reliée aux caractéristiques et propriétés du clinker à respecter qui ont été évoquées au paragraphe III.2.1.

Nous avons émis certaines hypothèses quant à la nature des différentes matières premières et de leurs émissions.

Matières premières nécessaires pour le clinker

- Le limon est une roche meuble, dont la taille des grains est intermédiaire entre les argiles et les sables. Il est principalement constitué de silice et de calcaire. Vu le manque de données concernant une composition précise, et l'absence d'une base de données spécifiques dans le logiciel SimaPro7.1, nous prendrons comme première hypothèse une composition de 25% de silice et 75% de calcaire en poids, ce qui nous donne la même composition simplifiée que le tuffeau. Cette approximation n'engendrera pas énormément d'erreurs vu le faible taux de limon présent et permettra de prendre en compte l'utilisation de ce matériau grâce à des valeurs connues.
- La craie et le tuffeau sont les composants majoritaires du clinker. Ils apportent l'oxyde de calcium. Nous supposerons en première approximation que la craie est uniquement composée de calcaire de formule chimique CaCO_3 . Le tuffeau est défini comme une roche calcaire renfermant des grains de quartz et de mica, et qui est utilisée en construction malgré sa friabilité. [22]

Le tuffeau utilisé, provenant de la base de données SimaPro7.1, est, quant à lui, composé de 75% de calcaire et de 25% d'argile qui selon sa nature peut regrouper différents composés chimiques. [7]

L'argile est généralement source de silice et d'alumine. L'argile de type kaolin a pour formule chimique $2\text{SiO}_2\text{AlO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ tandis que celui du type montmorillonite possède la formule $5\text{SiO}_2\text{AlO}_3\text{MgO} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Nous ne possédons pas de détails quant à la composition de l'argile employée dans la base de données tuffeau utilisée.
- Les produits ferreux permettront d'apporter la dose d'oxyde de fer nécessaire à la formation du clinker. Ils peuvent se trouver dans des matières très diverses, qui sont généralement des produits de récupération comme les pneus. [3], [6]

- Les boues proviennent en général de stations d'épuration belges. Le four permet de valoriser ces boues sèches ou humides ainsi que les terres polluées provenant des sites suivis par la SPAQuE (assainissement des sites industriels wallons). [6]
- Les cendres volantes sont des solides, des matériaux au grain fin résultant de la combustion de charbon pulvérisé dans des fours de centrale électrique. Elles agrègent des propriétés intrinsèques aux gisements et des transformations profondes. Elles sont collectées grâce à des séparateurs mécaniques ou électrostatiques.

Lors des premières études, les cendres ont été définies comme généralement simples du point de vue morphologique, elles sont généralement constituées en majorité de particules sphériques. D'un point de vue chimique, elles se composent essentiellement de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3) et d'un point de vue minéralogique, il existe une phase amorphe unique souvent prépondérante (verres silico-alumineux) et des phases cristallisées inertes (mullite, quartz, magnétite).

D'autres études ont montré que les cendres volantes peuvent être classifiées différemment et d'une manière un peu plus complexe selon le contenu du charbon, la réactivité et la solubilité de la silice, l'activité pouzzolanique, etc. Cette dernière propriété définit la capacité de certains matériaux à réagir avec l'oxyde de calcium (CaO) ou l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en présence d'eau à température ambiante, afin de former un solide insoluble dans l'eau.

Les cendres volantes peuvent également être divisées en deux catégories F et C, elles y sont classées en fonction de leur origine. Celles de la catégorie F sont normalement produites par combustion de charbon bitumeux ou anthracite. Elles ont des propriétés pouzzolaniques. Celles entrant dans la catégorie C sont normalement produites par combustion de charbon sub-bitumeux ou de lignite. En plus de posséder des propriétés pouzzolaniques, les cendres volantes de cette catégorie ont également des propriétés cimentaires. Certaines cendres de cette catégorie contiennent plus de 10% de chaux. [40], [1]

Comme nous pouvons le voir, les cendres volantes sont des produits secondaires que les industries cherchent à valoriser, et cela peut se faire grâce à leur utilisation en cimenterie. Dans ce travail, nous ne tiendrons pas compte de la pollution émise lors de leur production, car elles n'ont pas été créées dans le but d'être incorporées au clinker pour fabriquer du ciment. Leur transport jusqu'à l'usine sera, quant à lui, pris en compte.

Les cendres volantes peuvent également s'utiliser comme additifs lors de la mouture du ciment. Nous allons donc, en première approximation, supposer que la moitié du pourcentage communiqué par CBR Lixhe est utilisé pour la fabrication du clinker, et l'autre moitié comme additif.

Additifs nécessaires pour le ciment

- Le gypse naturel est un minéral composé de sulfate de calcium hydraté de formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Il sert de liant hydraulique, et est ajouté lors de la mouture pour donner les propriétés au ciment. Le gypse résiduaire possède les mêmes propriétés, mais lui provient de récupération de déchets. Le premier sera donc pris en compte en ce qui concerne les émissions résultant de l'extraction, le second non. En effet, il fut déjà employé avant d'être réutilisé et valorisé en cimenterie pour une seconde fois. Les émissions concernant son extraction ont déjà été comptabilisées

précédemment, il serait injustement pénalisant de les prendre en compte une seconde fois.

- Le laitier de haut fourneau est obtenu lors de la production d'acier, et donc de l'obtention de la fonte. Le laitier est, à la base, une roche liquide aux environs de 1500°C, et est composée des parties non-métalliques du minerai combinées à la chaux. Selon la teneur des minerais en fer, une tonne de fonte engendrera jusqu'à environ 500 kg de laitier.

Selon le traitement imposé au laitier liquide, nous obtiendrons un laitier dit vitrifié ou granulé après arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression, ce qu'on peut également appeler la trempe, ou un laitier dit bouleté après trempage partiel ou total à l'air.

Le laitier se compose principalement de chaux (CaO), de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃) et de magnésie (MgO).

Une des caractéristiques les plus importantes du laitier est sa réactivité ou hydraulité. Cette prise hydraulique, en présence d'eau et d'un agent basique, est très peu exothermique, est lente et permet d'atteindre de très hautes performances sur une longue durée.

Le laitier peut entrer dans la composition du ciment comme additif pour sa fonction de liant hydraulique, mais il peut également remplacer une partie du clinker ce qui permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. [11]

Le laitier est également un sous-produit d'une réaction à faible valeur ajoutée. Le producteur essaie de le valoriser au maximum, et vu les propriétés ici du laitier, ce produit peut facilement entrer dans l'industrie cimentière. Encore une fois, pour cette raison, nous ne tiendrons pas compte de la pollution liée à sa production. Seul son transport sera comptabilisé.

- Les cendres volantes peuvent également être utilisées comme additifs lors de la mouture du ciment. Les propriétés et la composition sont en tous points identiques à celles utilisées en tant que matières premières pour le clinker. Les émissions prises en compte à ce stade seront toujours le transport de ces cendres jusqu'à l'installation de mouture. Le pourcentage utilisé comme additif sera donc égal à la moitié du pourcentage communiqué par CBR Lixhe.

L'énergie nécessaire pour produire une tonne de clinker est de 3,5 gigajoules. Les combustibles utilisés pour la fournir sont répartis dans les pourcentages énergétiques suivants :

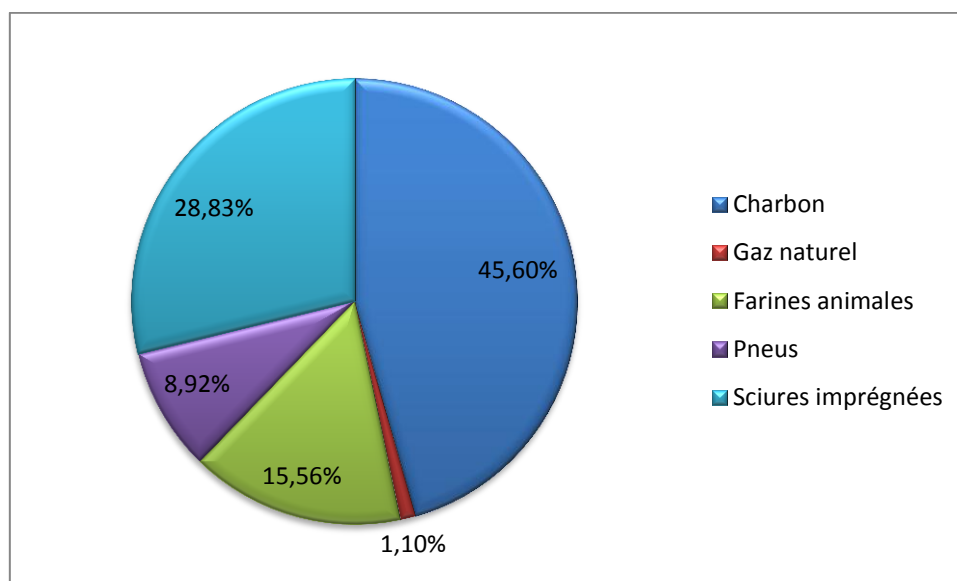


Figure VI.5 Pourcentages en MJ des différents combustibles utilisés par le système CBR Lixhe

Nous allons maintenant expliciter les hypothèses concernant les différents combustibles. Les combustibles de substitution fournis par le rapport environnemental de CBR Lixhe étaient plus nombreux que les 3 présentés ici. Dans ce travail, nous nous sommes basés sur les trois plus grands pourcentages, les autres étant en bien plus faible proportion. Les chiffres originaux se trouvent dans le rapport environnemental de 2006 de CBR Lixhe. [6]

Combustibles fossiles

- Le charbon est le combustible fossile le plus utilisé chez CBR Lixhe. Il constitue presque la moitié des ressources énergétiques nécessaires à la fabrication de clinker. Le charbon utilisé en Belgique est importé depuis la fermeture des charbonnages. Il existe deux marchés, l'atlantique et le pacifique. Le marché pacifique subit une pression assez importante des pays en voie de développement du continent asiatique. La Belgique se fournit en général sur le marché atlantique, avec des charbons provenant des Etats-Unis, du Venezuela, de la Colombie et de l'Afrique du Sud. En effet, les réserves de Sibérie ne sont pas mobilisables à des prix compétitifs et le charbon provenant de Pologne est directement absorbé par les pays limitrophes.

Son faible coût et son pouvoir calorifique assez élevé en font un combustible de choix pour son utilisation en cimenterie. Le charbon forme des cendres volantes, il constitue un apport en soufre ainsi qu'en composants volatils.

Le charbon utilisé chez CBR Lixhe possède un pouvoir calorifique inférieur (PCI) qui peut varier dans une fourchette allant de 24 à 28 MJ/kg. Dans ce travail, nous avons supposé un PCI de 26 MJ/kg.

Pour tenir compte de l'utilisation de charbon, nous utiliserons la base de données charbon noir du logiciel SimaPro7.1. Cette dernière se réfère au mixte belge et prend en compte le transport du charbon jusqu'aux installations. Une distance moyenne a été calculée. Cette base de données comptabilise également l'émission de poussières lors du transport, du chargement et du déchargement ainsi que les pertes moyennes en charbon. [9], [21]

- Le gaz naturel est peu utilisé en cimenterie, il représente un peu plus d'1 % de la consommation énergétique. Sa composition n'a pas énormément d'importance en ce qui concerne le clinker. Il est utilisé lors de l'allumage du four.
Nous avons supposé un PCI de 45 MJ/kg ce qui correspond à un gaz naturel provenant de la Mer du Nord. [21], [9]

Combustibles de substitution

- Les farines animales sont le résultat de la transformation d'un animal vivant en carcasse. Une partie de l'animal va être utilisée comme produit noble, la viande, et le reste va engendrer des coproduits divers qui représentent un volume important. De ceux-ci, seulement une partie va être valorisée directement ou après transformation en alimentation humaine. Le reste est soit détruit, soit utilisé pour fabriquer des aliments pour animaux, directement ou après transformation en farines et graisses animales.

Le terme « farines animales » regroupe différents types de farines intégrées ou qui ont été intégrées, en pourcentage divers, dans l'alimentation animale, ou utilisée pour l'amendement de sols. Ces différents types de farines sont les farines de viande et d'os (FVO), de volaille, de poissons, de plumes et de sang. [19]

Par le passé, ces farines, à grande vertu protéique, rendaient un double service. Elles permettaient de valoriser les déchets des activités des abattoirs et elles offraient également la possibilité de dépendre moins des importations de soja d'origine américaine. Suite aux crises de la dioxine et par crainte de la maladie de la « vache folle », cette méthode n'est plus possible. Vu la quantité importante de farines animales fabriquée chaque année, et vu le remplissage total des sites de stockage, il a fallu trouver un moyen d'éliminer ces farines. Une partie est incinérée en incinérateur classique, celle considérée à risque. L'incinération peut également avoir lieu en four de cimenterie. La haute température régnant dans le four, ainsi que le long temps de séjour des gaz de combustion permettent la combustion de ces farines au pouvoir calorifique relativement élevé (environ 19 MJ/kg). [31]

Les farines animales peuvent avoir un taux d'humidité variable, ainsi qu'une composition différente d'un type de farine à l'autre. Elles comprennent néanmoins du carbone, de l'azote, du soufre, de l'hydrogène et des composés minéraux. Une composition moyenne a été recalculée sur base de données trouvées dans la littérature ainsi que de la valeur du PCI. Le calcul se trouve à l'Annexe 7.

Les farines animales seront prises en compte ici en termes de transport et non en termes d'émissions en ce qui concerne la production. Les farines animales sont un coproduit du marché de l'alimentation. Elles n'ont pas été créées dans le but d'être brûlées dans un four de cimenterie. Les farines valorisées chez CBR Lixhe proviennent de France pour une grande partie. Nous pouvons donc en déduire, que vu le chemin parcouru, il n'y a pas d'autres solutions pour l'élimination de ces farines que d'en brûler une partie en cimenterie.

- Les pneus sont des déchets qui posent de plus en plus de problèmes point de vue élimination vu le nombre sans cesse croissant de voitures circulant sur nos routes. Après tri ou un éventuel prétraitement, les pneus sont conduits dans des entreprises de traitement. Ces dernières se doivent de respecter les objectifs légaux à savoir qu'au moins 25 % des pneus usés soient rechapés pour être remis sur le marché et

réutilisés, que 20 % des pneus doivent être recyclés par transformation en granulats ou en poudrette et pour finir que les 55 % restant soient valorisés.

C'est pour le traitement de ces 55 derniers pourcents que la cimenterie peut intervenir. En effet, vu leur constitution homogène, les pneus seront des combustibles de substitution assez stables. Leur teneur en métaux n'est pas un problème dans une cimenterie, ils peuvent entrer dans la composition du clinker, mais dans des proportions bien définies afin de conserver la qualité du clinker comme nous l'avons évoqué au paragraphe III.2.1.

Le PCI des pneus a été calculé sur base de leur composition, le caoutchouc présent en plus grande quantité étant assimilé à du polyisoprène, de formule chimique $(C_5H_8)_n$. Ce calcul se trouve à l'Annexe 7. [49], [24], [23]

- Les sciures imprégnées font partie des déchets dits dangereux. Ils sont composés de sciures de bois imprégnées de déchets difficilement valorisables par une autre voie. Ces déchets peuvent être des résidus de peintures, de colles, de vernis, de fonds de cuve, de déchets pulvérulents organiques, de boues organiques, etc. [17]

Les solvants contiennent généralement une certaine quantité de matière dangereuse, ils doivent donc être traités avant d'être utilisés en cimenterie. Les déchets à valoriser sont amenés à des entreprises de traitement qui constituent le relais entre les collecteurs de déchets bruts et les cimentiers. Sur le site, ils vont subir plusieurs étapes comme l'analyse de pré-acceptation, l'analyse et l'échantillonnage de la matière de chaque camion entrant, etc. Les échantillons sont alors conservés pendant 6 mois et peuvent être contrôlés à tout moment par un laboratoire agréé. Un contrôle final est également prévu, ainsi qu'un autre lorsque le produit arrive à la cimenterie. Les déchets doivent permettre de rester dans les limites du permis d'exploitation de l'usine, si ce n'est pas le cas, ils sont renvoyés à la plateforme de traitement. Le résidu obtenu a généralement un PCI aux environs de 11,5 MJ/kg et est composé d'environ 20% d'eau qui s'évapore, de 20% de minéraux qui entrent dans la composition du clinker et de 60% de matières organiques qui fournissent de l'énergie. Ces pourcentages peuvent évidemment varier comme nous le verrons à l'Annexe 7.

Le but de la manœuvre est également de permettre une réduction de l'utilisation des combustibles fossiles par remplacement de combustibles de substitution. Cela permet de valoriser l'énergie ainsi que la matière contenue dans les déchets tout en conservant la qualité du clinker. Cette méthode par sciures imprégnées évite tout déchet ultime à l'entreprise de traitement de déchets tout comme à la cimenterie. [33]

L'unité fonctionnelle du système se base sur la production d'une tonne de ciment de type Portland ainsi que la combustion de 98,95 kg de déchets et la production de 75,65 kWh. Utilisant les déchets comme combustibles, nous devons considérer une centrale électrique qui produira les kWh demandés.

Cette centrale électrique se base sur le mixte belge avec nucléaire. Les combustibles fossiles utilisés sont le charbon, le gaz naturel, le gaz industriel et le fuel. Pour produire l'électricité, l'énergie hydraulique et le nucléaire sont aussi considérés. Les pourcentages des différents combustibles utilisés se trouvent dans le Tableau VI.1.

Charbon	13,60%
Gaz naturel	22,70%
Gaz industriel	3,10%
Hydro	1,60%
Nucléaire	55,60%
Fuel	1,40%
	98,00%

Tableau VI.1 Pourcentages des combustibles dans la production d'électricité.

Afin de calculer les émissions de la production d'électricité, nous nous sommes basés sur les pourcentages présentés au Tableau VI.1 ainsi que sur les bases de données SimaPro7.1 relatives aux différents combustibles.

Transports

Pour calculer l'apport des transports à l'impact environnemental, nous nous sommes basés sur les données de CBR Lixhe quant à la provenance des différents additifs ou matières premières de substitution et combustibles de substitution. [5]

Les matières premières ne seront pas prises en compte pour le transport, en effet, ces dernières se situent généralement à proximité de la cimenterie et sont acheminées le plus souvent par bandes transporteuses. Cette consommation sera déjà prise en compte par les bases de données SimaPro7.1 que nous utilisons.

Les combustibles fossiles n'entreront pas non plus en jeu, car pour ces derniers, nous allons utiliser les bases de données SimaPro7.1 pour tenir compte des différentes émissions, et dans ces dernières, un transport moyen est déjà comptabilisé.

Deux moyens de transport seront envisagés : le camion 16 tonnes et la péniche, l'usine CBR étant accessible par voie fluviale ou voie routière.

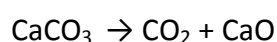
Nous avons émis certaines hypothèses quant à la provenance et le moyen de transport des différents composés. Elles se trouvent à l'Annexe 9 tout comme le calcul permettant d'obtenir la valeur en tonne kilomètre (tkm). Cette unité est choisie pour se référer à la base de données SimaPro7.1 qui nous fournit les émissions par tkm.

Emissions du four

Les émissions du four se basent ici sur les données techniques de 2006 fournies par la société CBR Lixhe. Certaines d'entre elles se trouvaient sous forme globale ou sous forme d'addition, nous avons donc du envisager certaines hypothèses. Les données originales ainsi que celles utilisées sous hypothèses se trouvent à l'Annexe 4.

En ce qui concerne les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), nous ne disposons pas de données. Nous avons recalculé la quantité émise à partir des matières premières, des combustibles fossiles et des combustibles de substitution.

Une grande quantité du CO₂ est produite par le procédé de clinkérisation lui-même, à savoir par la décarbonatation suivant l'équation suivante :



Équation 3 Décarbonatation

Ce CO₂ est alors indissociable du procédé et ne peut être évité. C’est pour cette raison, entre autres, que les producteurs de ciment, et plus particulièrement de clinker, cherchent des composés permettant de substituer en partie le clinker tout en gardant la même qualité de produit.

Pour les combustibles fossiles ou de substitution, nous nous sommes basés sur leur PCI afin de pouvoir recalculer ou confirmer une composition, et ainsi obtenir le pourcentage de carbone, celui-ci pouvant amener à la quantité de dioxyde de carbone. Les calculs de composition se trouvent à l’Annexe 7.

Pour ce calcul, nous avons pris en compte le CO₂ fossile et non le CO₂ biologique, estimant que celui-ci se trouvait à l’équilibre. Nous ne prendrons donc pas en compte le CO₂ provenant des farines animales. Théoriquement, nous ne devrions pas tenir compte du CO₂ provenant des sciures de bois contenues dans les sciures imprégnées, mais nous ne connaissons pas la proportion de départ du bois et des solvants. Nous allons donc estimer que tout le CO₂ fourni par les sciures imprégnées sera du CO₂ fossile à comptabiliser. Cette hypothèse ne changera pas grandement les résultats obtenus. Les calculs du dioxyde de carbone pour les systèmes CBR Lixhe se trouvent à l’Annexe 8.

Facteurs d’émission

Grâce aux données de composition des combustibles de substitution et des émissions à la cheminée, nous allons pouvoir calculer les facteurs d’émission pour certains métaux.

$$Facteur\ d'émission_{polluant,air} = \frac{(masse\ sortie)_{polluant,air}}{(masse\ entrée)_{polluant}}$$

Équation 4 Facteur d’émission

Les résultats sont présentés dans le Tableau VI.2. Les calculs se trouvent à l’Annexe 10.

Métal	Quantité contenue dans les déchets (kg)	Emissions à la cheminée (kg)	Facteur d'émission
Hg	1,55E-04	3,60E-05	23,28%
Zn	1,80E-01	4,34E-04	0,24%
Cd	8,07E-04	4,00E-05	0,003251%
Tl	1,86E-04		0,000749%

Tableau VI.2 Facteurs d’émission de certains polluants du système CBR Lixhe

Le calcul des facteurs pour les autres métaux n’a pas été réalisé par faute de données.

VI.2.2.2. Système basé sur le BREF et incinération des déchets

Ce modèle a été construit en supposant les mêmes consommations de matières premières et d’énergie que pour le système CBR Lixhe. Nous aurons donc les mêmes descriptions en ce qui concerne les matières premières et les combustibles fossiles. Ce système n’utilise pas de déchets pour le four de cimenterie.

En ce qui concerne les émissions du four à clinker, nous utiliserons les données du BREF Ciment et Chaux de 2001. Vu la large fourchette, nous utiliserons la valeur moyenne pour chaque composé. D’autres hypothèses seront également posées. Elles se trouvent à l’Annexe 5, tout comme les données utilisées.

En ce qui concerne les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), nous emploierons exactement la même démarche que celle utilisée pour le système CBR Lixhe. Les calculs se trouvent à l'Annexe 8.

Les déchets utilisés comme combustibles de substitution lors du précédent système seront ici valorisés en incinération. Le but de l'incinération est de traiter les déchets ainsi que réduire leur volume et leur danger en captant ou détruisant partiellement les substances dangereuses pouvant être libérées pendant l'incinération. Cela permet également une récupération d'énergie et de matière toutes deux contenues dans les déchets.

L'incinération consiste en l'oxydation des matières combustibles contenues dans les déchets. Ces derniers sont en général fortement hétérogènes comprenant des matières organiques, minérales, de l'eau et des métaux. Pendant l'incinération, des effluents gazeux apparaissent, et ce sont eux qui contiennent la majorité d'énergie sous forme de chaleur. Le processus de combustion a lieu dans la phase gazeuse en quelques fractions de seconde et libère simultanément de l'énergie. Cela peut mener à une réaction en chaîne si le pouvoir calorifique et l'oxygène sont suffisants et à ce moment là, il n'y a plus besoin d'ajout de combustibles fossiles pour maintenir la combustion.

Nous allons donc décrire les hypothèses utilisées pour la modélisation de l'incinérateur.

Incinérateur

Décrivons en premier lieu les étapes se déroulant dans un incinérateur :

- Le séchage et le dégazage sont les étapes où la matière volatile est éliminée à des températures allant généralement de 100 à 300°C. Cela ne requiert aucun agent oxydant, et dépend uniquement de la chaleur nécessaire pour le séchage et le dégazage.
- La pyrolyse consiste en la décomposition de la matière organique en absence d'agent oxydant à des températures allant de 250 à 700°C.
- La gazéification concerne la réaction entre les résidus carbonés, de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone (CO₂). Cela se déroule à des températures entre 500 et 1000°C, mais cela peut également arriver au dessus de 1600°C. La phase organique solide passe alors en phase gazeuse. Cette réaction est maintenue, grâce à la température, mais également par l'eau, la vapeur et l'oxygène.
- L'oxydation est l'étape où les combustibles à l'état gazeux créés dans les étapes précédentes sont oxydés à des températures entre 800 et 1450°C, cela dépendant la méthode employée.

Ces diverses étapes se déroulent en parallèle les unes avec les autres, et s'influencent également. [13]

En ce qui concerne les déchets à brûler, ce sont exactement les mêmes que ceux valorisés en cimenterie. Leur description a été explicitée au paragraphe VI.2.2.1.

L'incinérateur va donc les valoriser en les transformant en électricité et en chaleur. La quantité produite va dépendre de la composition et plus particulièrement du PCI des déchets. Grâce à ces valeurs ainsi qu'au rendement moyen d'un incinérateur (environ 22%), nous pouvons calculer les quantités de chaleur et d'électricité qui seront produites. A cette dernière, nous devons déduire la consommation de l'incinérateur en électricité, et nous

trouvons alors la valeur qui intervient dans l'unité fonctionnelle. Le calcul a déjà été fourni lors de la définition de l'unité fonctionnelle à l'Annexe 2.

La consommation en énergie provient de l'incinérateur lui-même, et dépend en grande partie de la nature des déchets à valoriser (certains déchets ne possèdent pas l'énergie suffisante pour entretenir la combustion, il leur faut un apport supplémentaire tandis que d'autres en possèdent suffisamment pour maintenir la réaction) et également du design de l'installation ou autrement dit, de l'énergie requise par les équipements de traitement des gaz (plus les émissions dans l'air doivent être faibles, plus l'énergie consommée sera grande).

Il peut également y avoir consommation d'agent chimique, reliée étroitement avec les équipements de traitement des gaz, ce qui dépend fortement du type de déchets et des émissions désirées. Plus ces émissions doivent être faibles, plus la quantité d'agent chimique sera élevée.

La chaleur fournie par l'incinérateur ne sera pas prise en compte ici. En effet, actuellement, il est difficile de l'utiliser et de la valoriser. La valorisation de la chaleur va dépendre d'un grand nombre de facteurs comme la tendance du climat, le prix et la demande. Il faudra aussi tenir compte de la température à laquelle la chaleur est récupérée, s'il est possible de la fournir à un réseau proche, etc. Vu la diversité des paramètres et le peu d'antécédents d'utilisation de la chaleur fournie par un incinérateur en Belgique, nous ne la prendrons pas en compte.

Les déchets à incinérer seront répartis en deux catégories distinctes à savoir les déchets municipaux solides qui sont dans ce cas les pneus et les farines animales, et les déchets dangereux à savoir les sciures imprégnées.

Les émissions relatives à la combustion vont dépendre de différents paramètres à savoir la composition et le contenu des déchets, les techniques utilisées dans le four ainsi que son design, et finalement le design et les opérations de l'équipement de nettoyage des gaz effluents. Elles seront, pour la plupart, données par le document BREF Incinération datant de 2006. Elles peuvent varier dans une fourchette assez large, et nous prendrons donc la valeur moyenne, tout comme nous l'avons fait en ce qui concerne les émissions du four. Les données utilisées ainsi que les hypothèses formulées se trouvent à l'Annexe 6.

Pour le dioxyde de carbone (CO_2), nous calculons les émissions sur base de la composition de déchets, en suivant la même démarche que pour les systèmes CBR Lixhe et BREF Charbon. Les calculs se trouvent à l'Annexe 8.

VI.2.2.3. Système SimaPro7.1 complété d'un incinérateur et d'une centrale électrique

Le système utilise la base de données ciment de Portland du logiciel SimaPro7.1. Comme nous l'avons déjà explicité, ce système prend en compte une valorisation des déchets mais en proportions moindres que dans le système CBR Lixhe.

La base de données nous fournit les consommations en matières premières, en combustibles fossiles et en déchets. Les combustibles utilisés dans ce cas-ci sont en proportions toutes différentes par rapport au système CBR Lixhe. Lorsque nous nous penchons sur les données du système, nous trouvons la répartition suivante en ce qui concerne les combustibles fossiles utilisés et la proportion des déchets :

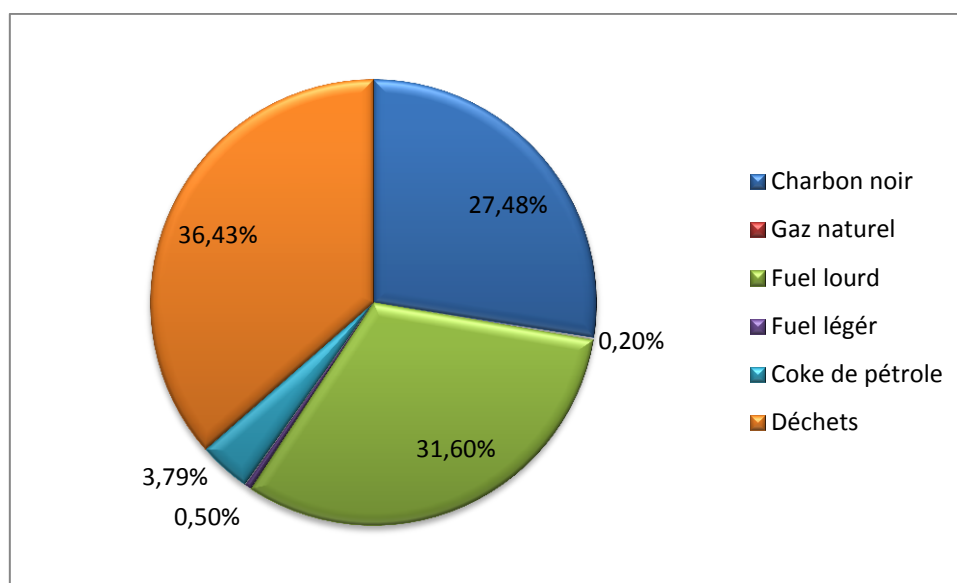


Figure VI.6 Pourcentages en MJ des différents combustibles utilisés dans le système SimaPro7.1

Nous remarquons ici que le four n'utilisera pas majoritairement comme combustible fossile le charbon noir, mais bien une combinaison de ce dernier avec du fuel lourd, du fuel léger et du coke de pétrole. Les déchets remplacent également ici un pourcentage notable de la quantité d'énergie nécessaire. Malgré tout, le pourcentage atteint 36% tandis que dans le système CBR Lixhe, il atteignait plus de 50%. Nous pouvons également noter ici que l'énergie nécessaire à la production d'une tonne de clinker dans ce système est à peu de choses près égale, après calcul, à la quantité d'énergie nécessaire dans le système CBR Lixhe. Ces valeurs sont respectivement de 3,34 GJ/ t clinker et de 3,486 GJ/t clinker. L'hypothèse de comparaison est donc bien valable ici, sous réserve des rajouts nécessaires pour obtenir l'unité fonctionnelle décrite plus haut.

Les déchets utilisés dans le système ne sont pas directement explicités, nous supposons dès lors que ce seront les mêmes que ceux qui ont été utilisés dans le système CBR Lixhe. Ils resteront dans des proportions constantes entre eux mais avec un pourcentage moindre. Ces nouvelles valeurs permettront de calculer la quantité de déchets à incinérer et donc l'électricité produite par l'incinération ainsi que la quantité d'électricité à produire par le mixte belge avec nucléaire afin d'obtenir les quantités décrites par l'unité fonctionnelle. Les calculs se trouvent à l'Annexe 3.

La production d'électricité par le mixte belge avec nucléaire a été explicitée au paragraphe VI.2.2.1 tout comme l'incinérateur l'a été au paragraphe VI.2.2.2.

VI.2.3. Sources de documents publiés

Les références bibliographiques utilisées pour l'évaluation des flux sont mentionnées dans les paragraphes précédents.

VI.2.4. Procédures de calcul

Les hypothèses employées pour les estimations des flux intrants et sortants ont été explicités tout au long du paragraphe VI.2.2.

VI.2.5. Validation des données

Les données ont été comparées avec celles des années précédentes, et également, lorsque cela était possible avec des informations présentes dans d'autres sources.

VI.2.6. Analyse de sensibilité pour affinement des frontières

Une analyse de sensibilité a été effectuée (voir point VII.2). Elle traite de la sensibilité des systèmes (changement de la valeur d'émissions dans l'air de certains polluants) et de la sensibilité de la méthode Eco-Indicator 99.

VI.3. Evaluation de l'impact du cycle de vie

VI.3.1. Choix des catégories d'impacts, des indicateurs et des modèles

Ce point a été développé lors du Chapitre V.

VI.3.2. Classification

La classification se base sur la méthode Eco-Indicator 99. Elle considère différentes catégories d'impacts comme le cancer, les effets respiratoires inorganiques, etc. Ces catégories sont regroupées selon les trois catégories de dommages, à savoir la Santé humaine, la Qualité de l'écosystème et l'utilisation des Ressources.

Les catégories d'impact prises en compte sont les suivantes :

Santé humaine

- Effets cancérigènes sur les humains
- Effets respiratoires sur les humains causés par des substances organiques
- Effets respiratoires sur les humains causés par des substances inorganiques
- Dommages sur la Santé humaine causés par les changements climatiques

Qualité de l'écosystème

- Dommages sur la Qualité de l'écosystème causés par des émissions écotoxiques
- Dommages sur la Qualité de l'écosystème causés par l'effet combiné de l'acidification et l'eutrophisation

Ressources

- Dommages sur les Ressources causés par l'extraction de combustibles fossiles

Nous ne disposons pas de données relatives à certaines catégories comme l'utilisation ou la transformation des sols. Nous avons alors considéré l'impact environnemental correspondant comme nul.

Les impacts environnementaux des catégories comprenant l'émission de substances radioactives ont été négligés. La principale cause de radioactivité présente dans nos trois systèmes est l'utilisation d'énergie électronucléaire. Il est admis que cette radioactivité est nettement inférieure aux seuils de pollution radioactive fixés par les normes légales.

L'impact concernant l'extraction des ressources minérales avait été pris en compte dans un premier temps. Suite aux calculs effectués, nous pouvons remarquer que cette catégorie a un impact environnemental négligeable, et qu'il représente à peine 1 % de celui obtenu avec les ressources globales. Le calcul pour le système CBR Lixhe ainsi qu'un graphe représentatif se trouvent à l'Annexe 10. Dans la suite du travail, nous négligerons donc l'impact obtenu avec l'extraction des ressources minérales.

La liste suivante regroupe les polluants pris en considération dans ce travail. La liste figurant dans le guide Eco-Indicator 99 est plus complète. Les polluants compris dans l'inventaire suivant ont été choisis de manière arbitraire, ce qui pourrait remettre en cause la validité des résultats. Néanmoins, le choix a été effectué sur base d'études LCA [34] et en particulier sur celle étudiant une cimenterie [36].

Dans l'air

Polluants dans l'air			
Acétaldéhyde	Chrome VI	Fer	PAHs
Ammoniac	Cuivre	Mercure	Plomb
Arsenic	Dioxines	Méthane	poussières
Cadmium	Dioxyde de carbone	Nickel	SO _x
Chrome	Etain	NO _x	Zinc

Dans l'eau

Polluants dans l'eau		
Arsenic	Chrome VI	PAHs
Cadmium	Mercure	Plomb
Chrome	Nickel	Zinc

Dans le sol

Polluants dans le sol		
Arsenic	Cuivre	Plomb
Cadmium	Mercure	Zinc
Chrome	Nickel	

Ressources

Combustibles fossiles	
Charbon brun	"Crude Oil"
Charbon noir	Gaz Naturel

VI.3.3. Caractérisation

Les facteurs de dommages relatifs aux 3 catégories à savoir la Santé humaine, la Qualité de l'écosystème et les Ressources sont exprimés respectivement en DALY's/kg, PDF.m².an/kg et MJ de surplus d'énergie/kg de combustible extrait ou par m³ de gaz extrait ou par MJ d'énergie extraite.

Les quantités émises des différentes substances rapportées à l'unité fonctionnelle (production d'une tonne de ciment, valorisation de 98,95 kg de déchets et production de 75,65 hWh d'électricité) seront multipliées par ces différents facteurs pour obtenir un score global pour chaque catégorie de dommages.

VI.3.4. Normalisation

Nous obtenons le score normalisé de chaque catégorie en divisant le score caractérisé par une valeur de référence donnée pour chaque perspective, et qui exprime la pollution moyenne produite par un habitant européen pendant 1 an. Dans la méthode Eco-Indicator 99, nous pouvons également trouver les impacts pour chaque catégorie de façon normalisée. Les facteurs de normalisation selon la perspective envisagée se trouvent dans le Tableau VI.3.

VI.3.5. Pondération

Le score pondéré est obtenu à partir des résultats normalisés. Il suffit de multiplier ces derniers par des facteurs de pondération dépendant de la perspective employée. Le score déterminé est appelé score pondéré ou éco-score, et est exprimé en milli-points. Les facteurs de pondération selon la perspective envisagée se trouvent dans le Tableau VI.3.

	Facteur de normalisation			Facteur de pondération		
	Hiérarchiste	Egalitaire	Individualiste	Hiérarchiste	Egalitaire	Individualiste
Santé humaine	1,54E-02	1,55E-02	8,25E-03	400	300	550
Qualité de l'écosystème	5,13E+03	5,13E+03	4,51E+03	400	500	250
Ressources	8,41E+03	5,94E+03	1,48E+02	200	200	200

Tableau VI.3 Facteurs de normalisation et de pondération selon les perspectives envisagées

CHAPITRE VII. RESULTATS

Les résultats de l'étude LCA appliquée à l'utilisation des déchets en cimenterie sont présentés selon la norme ISO/FDIS 14043.

VII.1. Identification des résultats les plus significatifs

Les résultats présentés tout au long de ce chapitre se baseront sur les trois systèmes précités. Nous allons donc les comparer et présenter les résultats indispensables à la discussion. La perspective utilisée sera la Hiérarchiste. De nombreux graphiques et tableaux de résultats se trouvent également à l'Annexe 11.

VII.1.1. Caractérisation, normalisation, pondération.

Dans ce paragraphe, nous allons comparer les scores caractérisés, normalisés et pondérés obtenus par les trois systèmes et leur répartition entre les trois catégories (Santé humaine, Qualité de l'écosystème, Ressources).

Les trois systèmes sont évoqués dans le même ordre que vu précédemment, et les valeurs présentées ici ont envisagé le système en entier, à savoir la production de l'unité fonctionnelle.

Les valeurs utilisées pour le système BREF charbon se basent sur les données du BREF Ciment et Chaux de 2001. Nous envisagerons l'utilisation des données du Draft de septembre 2007 lors de l'analyse de sensibilité au paragraphe VII.2.

Dans la construction du score pondéré, nous avons d'abord obtenu le score caractérisé de chacune des sous-catégories, ces scores sont présentés à la Figure VII.1, en valeurs relatives. En effet, les différentes sous-catégories ne possèdent pas la même unité. Cette caractérisation permet d'observer l'importance des différents systèmes selon la catégorie d'impact.

Nous pouvons remarquer que le système CBR Lixhe présente un net avantage par rapport aux autres systèmes pour la plupart des sous-catégories. En effet, son impact sera moindre pour les effets cancérigènes, les effets respiratoires organiques et inorganiques, l'acidification-eutrophisation et les ressources. Il présente par contre un impact plus important pour l'écotoxicité.

Le système qui se révélera le moins avantageux pour la plupart des sous-catégories, au vu de la Figure VII.1, sera le système BREF charbon. Le système SimaPro7.1 présentera un impact plus important en ce qui concerne les ressources et les effets respiratoires organiques.

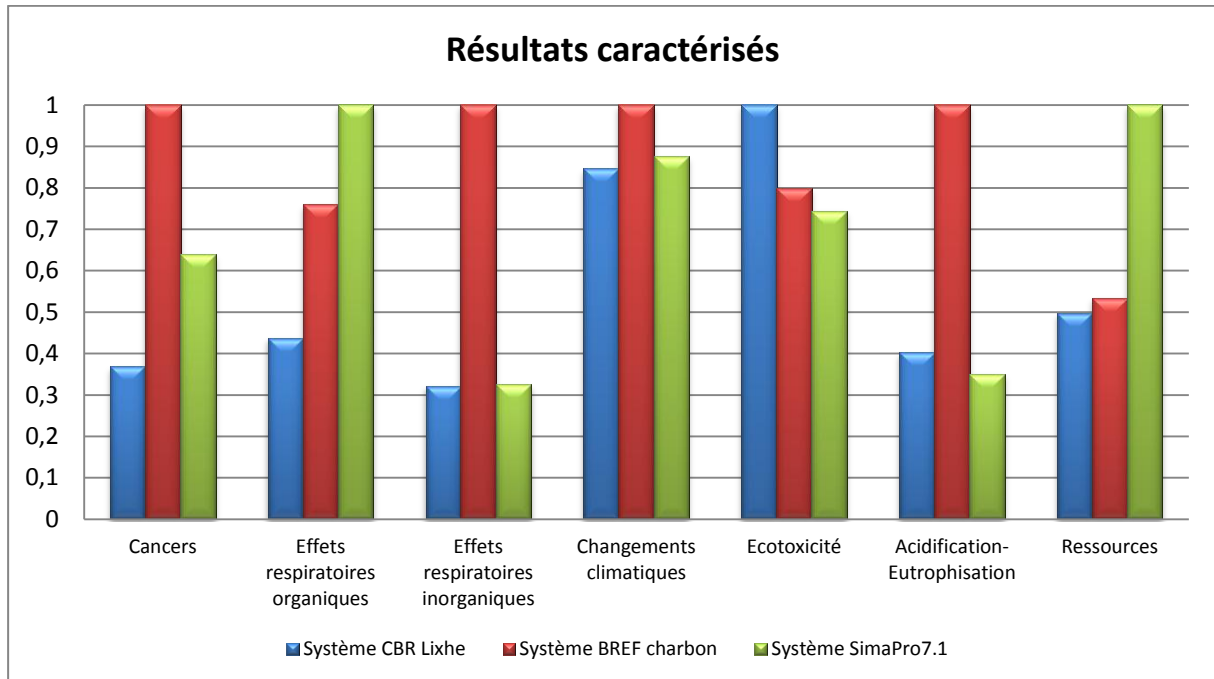


Figure VII.1. Résultats caractérisés en valeurs relatives des différents systèmes envisagés

Nous allons désormais normaliser les scores caractérisés obtenus afin de pouvoir comparer les différentes sous-catégories entre elles. L'unité utilisée pour la Figure VII.2 est le milli-point par unité fonctionnelle (UF). Les valeurs calculées sont données dans le Tableau X.42 à l'Annexe 11.

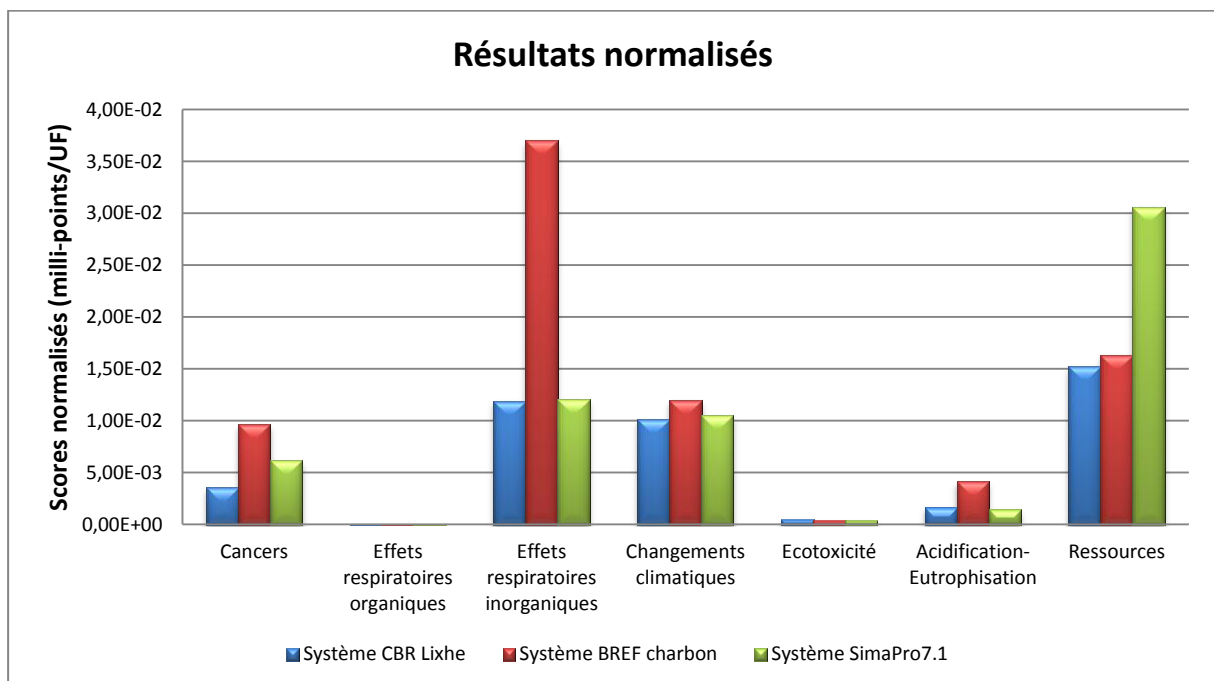


Figure VII.2 Résultats normalisés des différents systèmes envisagés en milli-points/unité fonctionnelle

Nous pouvons remarquer, que lorsque les scores ne sont pas encore pondérés, les sous-catégories qui se marquent le plus sont les effets cancérigènes, les effets respiratoires inorganiques, les changements du climat et les ressources.

Les scores pondérés sont quant à eux présentés à la Figure VII.3 et à la Figure VII.4 ainsi qu'à l'Annexe 11. Ils seront exprimés en milli-points/unité fonctionnelle (UF).

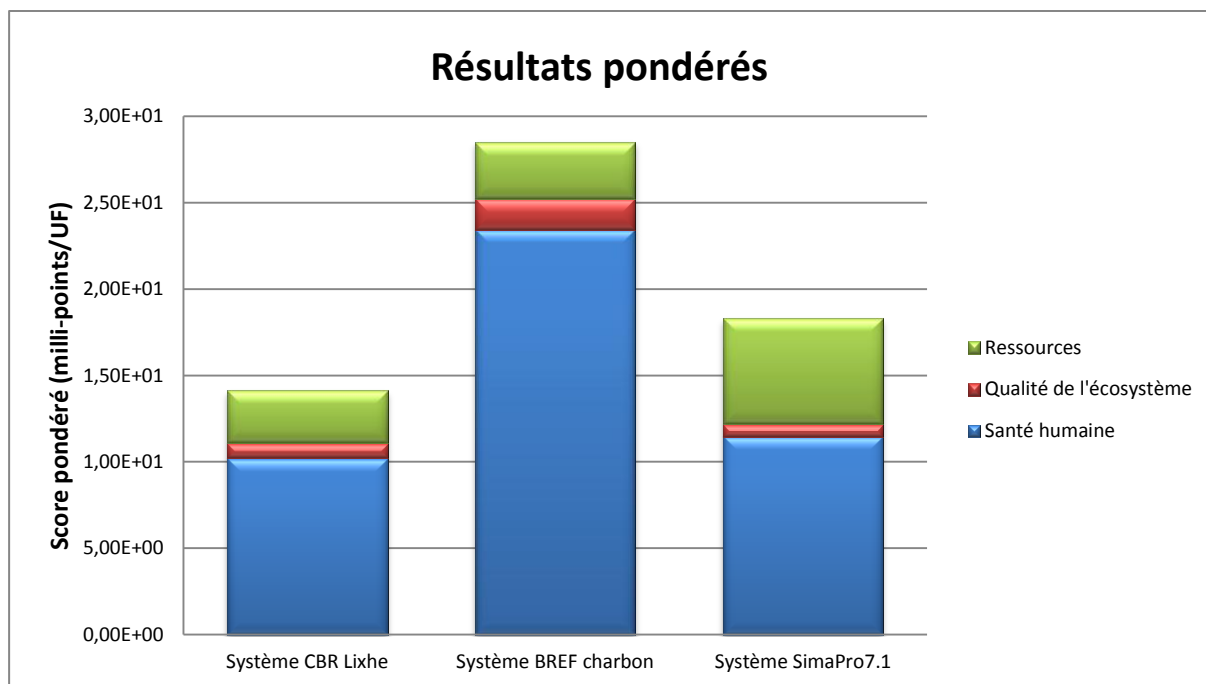


Figure VII.3 Scores pondérés des différents systèmes envisagés

Nous pouvons d'ores et déjà remarquer que la catégorie contribuant le plus à l'éco-score pour chacun des systèmes est la Santé humaine qui comprend 4 sous-catégories. Les deux autres (Qualité de l'écosystème et Ressources) y participeront de façon moindre comme le montre le graphique à la Figure VII.3.

Nous allons désormais nous pencher sur les sous-catégories afin de déterminer lesquelles seront les plus importantes et si elles restent identiques à celles observées lors des résultats normalisés.

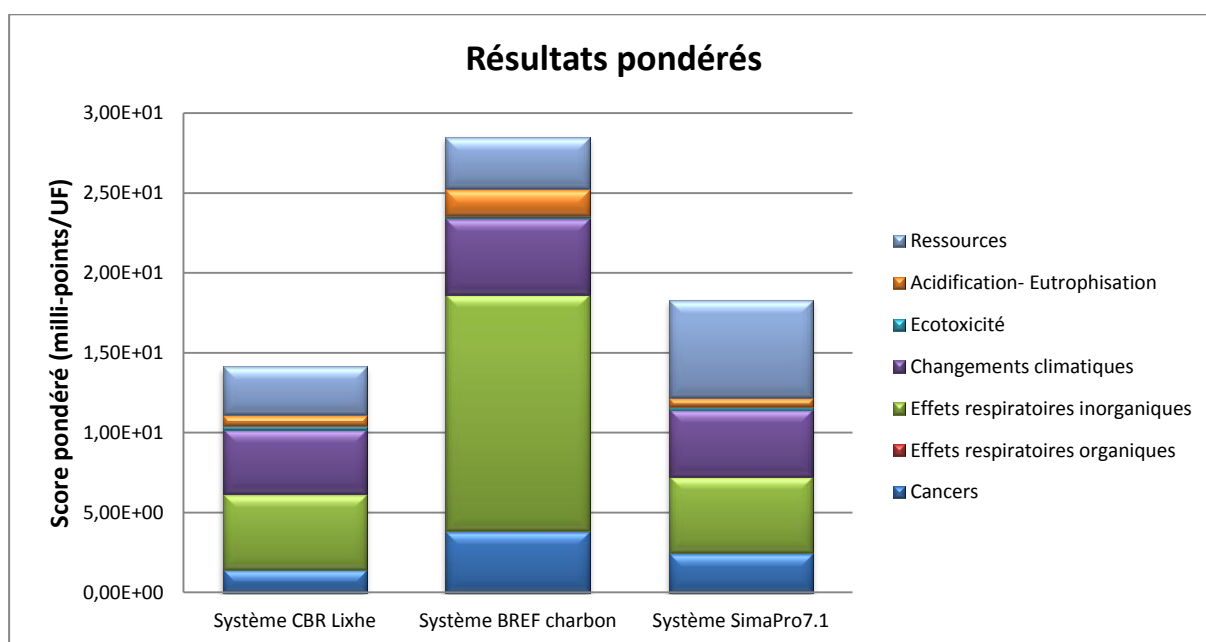


Figure VII.4 Scores pondérés des sous-catégories des différents systèmes envisagés

Par rapport à l'analyse des scores normalisés, nous remarquons que les ressources n'ont plus l'impact le plus important. Cela résulte du facteur de pondération plus faible que pour les autres catégories.

Les sous-catégories affectant le plus l'éco-score sont les effets respiratoires inorganiques, les changements climatiques ainsi que les ressources. Pour le système se basant sur le BREF et n'utilisant que du charbon, la sous-catégorie concernant les effets cancérigènes est également importante.

Nous envisagerons donc l'analyse de ces quatre sous-catégories en détails afin d'y déterminer les facteurs clés. Les autres peuvent être considérées comme négligeables.

VII.1.1.1. Explications des différences entre les systèmes envisagés

Nous allons désormais essayer d'expliquer d'où viennent ces différences d'éco-score entre les différents systèmes envisagés. Pour ce faire, nous allons comparer les facteurs principaux des 4 sous-catégories déterminées comme prépondérantes.

Effets cancérigènes

Nous pouvons remarquer, sur base des calculs et des figures précédentes, que le score relatif à la sous-catégorie « effets cancérigènes » sera le plus élevé lors du système utilisant les données du BREF.

Le système SimaPro7.1 est, quant à lui, plus complet que les systèmes CBR Lixhe et BREF charbon en ce qui concerne les relevés d'émissions de substances cancérigènes. En effet, les données dont nous disposions étaient relatives aux émissions dans l'air, celles concernant l'eau et le sol proviennent des bases de données SimaPro7.1. Elles interviennent lorsque nous prenons en compte l'extraction des matières premières ou les transports, par exemple.

Nous obtenons alors la Figure VII.5 représentant les scores caractérisés des différents polluants entrant en compte dans cette sous-catégorie.

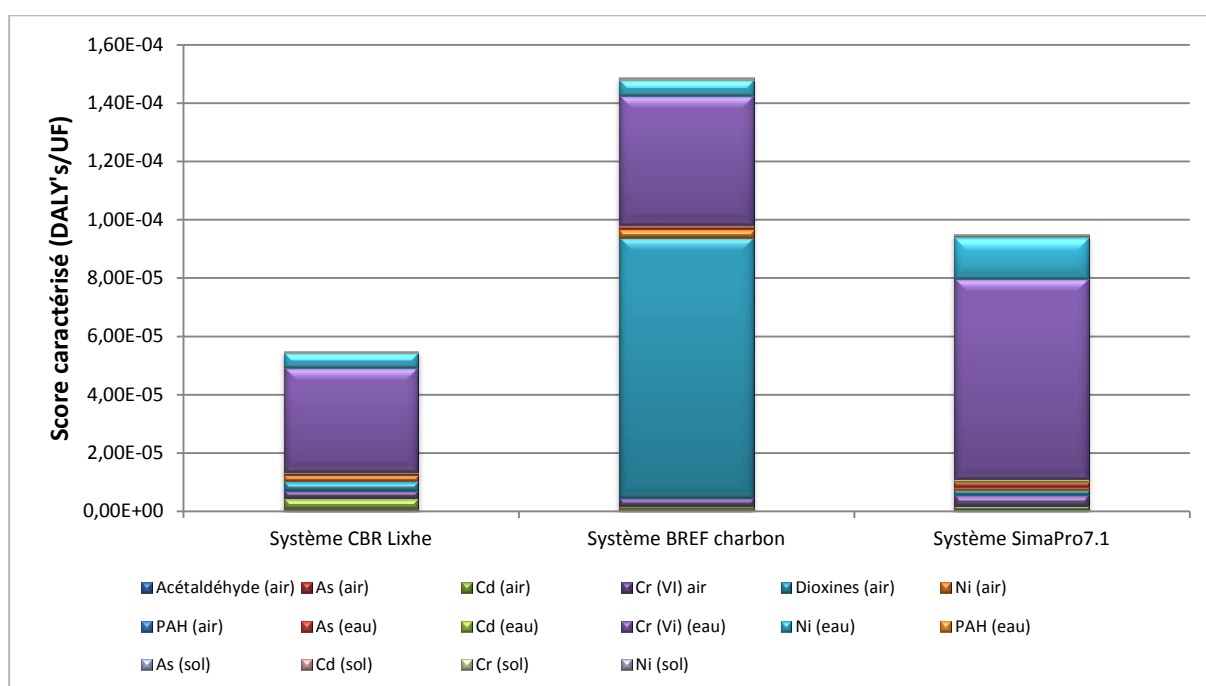


Figure VII.5 Polluants à effets cancérigènes des différents systèmes envisagés

Les différents polluants se retrouvent dans l'ordre de la barre de légende, celle-ci se lisant de gauche à droite, l'acétaldéhyde étant le premier du bas et le nickel dans le sol le premier en partant du haut.

Au vu de la Figure VII.5, nous pouvons déjà affirmer que les polluants apportant la contribution la plus grande pour le score de cette sous-catégorie se trouvent dans l'air ou dans l'eau. L'apport des polluants dans le sol est négligeable.

Nous pouvons également remarquer que le chrome (VI) de l'eau se trouve présent dans chaque système en forte proportion. Il apparaît lors de l'extraction des matières premières et des combustibles fossiles, lors du transport et de la production d'électricité. Nous estimons qu'il n'y a pas de rejets d'eaux usées pour les opérations se déroulant sur le site cimentier. Le chrome (VI) ne provient donc pas de cette étape.

En ce qui concerne les autres polluants, celui qui ressort encore est le nickel dans l'eau, nous pouvons alors supposer la même hypothèse que pour le chrome (VI).

Les dioxines représentent le polluant en plus grande proportion dans le système BREF charbon. Les dioxines ont un coefficient d'impact très important par rapport aux autres polluants entrant en compte dans cette catégorie. Une faible quantité au départ peut donc provoquer un gros score en ce qui concerne l'impact. Par rapport à la société CBR Lixhe qui obtient une quantité moyenne en ce qui concerne les dioxines qui est 10 fois moindre que la valeur du permis d'exploitation, à savoir 0,01 ng/Nm³ contre 0,1 ng/Nm³ pour le permis, le BREF fournit des quantités pouvant être inférieures à 0,1 ng/Nm³ et ayant comme borne maximum 0,5 ng/Nm³. Nous voyons alors qu'en prenant la moyenne, nous obtenons une valeur presque 30 fois plus grande pour le système BREF charbon que pour celui CBR Lixhe. Vu le coefficient d'impact, ceci peut expliquer la différence de score pondéré obtenu entre les deux systèmes.

Effets respiratoires inorganiques

Le score le plus important dans cette sous-catégorie sera également obtenu par le système BREF charbon.

Analysons maintenant quelles sont les causes d'un score si élevé. Les différents polluants entrant en compte dans cette sous-catégorie sont repris à la Figure VII.6.

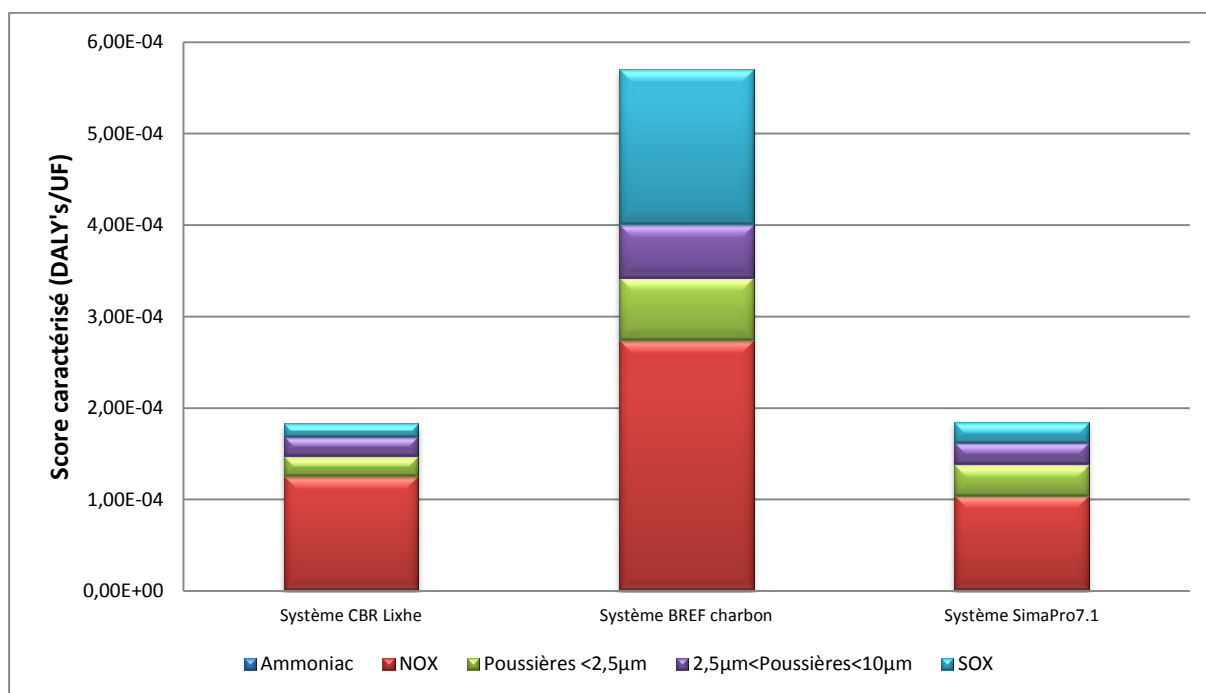


Figure VII.6 Polluants à effets respiratoires inorganiques des différents systèmes envisagés

Nous pouvons remarquer ici, que ce sont les composés azotés (NO_x) qui auront l'impact le plus important quel que soit le système envisagé.

A part en ce qui concerne les composés soufrés pour le système BREF charbon, les autres ont une importance négligeable sur le score caractérisé. Les composés à analyser plus en détails pour cette sous-catégorie seront les NO_x ainsi que les SO_x . Leur formation et les techniques de réduction de ces composés ont été abordées au paragraphe IV.2.1.

En ce qui concerne les données provenant du BREF, elles sont encore une fois une moyenne des valeurs prévues comme bornes supérieure et inférieure. Celles-ci sont très éloignées les unes des autres, surtout en ce qui concerne les deux composés les plus importants à savoir les NO_x et les SO_x . Nous envisagerons alors une analyse de sensibilité en faisant varier la quantité de ces deux composants. Nous utiliserons également les valeurs envisagées par le Draft.

Changements climatiques

Les polluants entrant en compte dans cette sous-catégorie sont le méthane (fossile et biologique), le dioxyde de carbone fossile (CO_2) et l'oxyde nitreux (N_2O). Le score le plus important de cette sous-catégorie est encore une fois obtenu par le système BREF charbon.

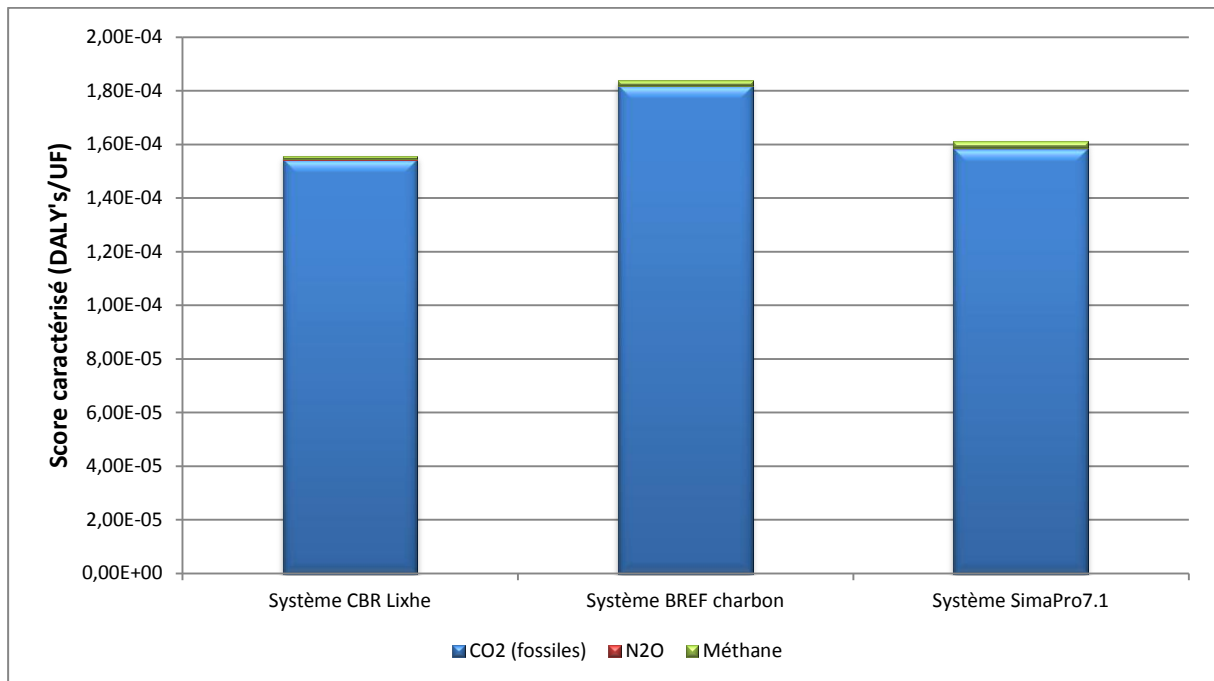


Figure VII.7 Polluants contribuant aux changements climatiques pour les différents systèmes envisagés

Nous pouvons remarquer que le seul composant contribuant activement au score pondéré de cette sous-catégorie pour chaque système envisagé est le dioxyde de carbone.

Excepté dans la base de données SimaPro7.1 où la valeur nous était fournie, nous l'avons recalculée pour les deux autres systèmes. Les calculs se trouvent à l'Annexe 8.

Nous pouvons d'ores et déjà remarquer que les deux systèmes utilisant des déchets ont une valeur en CO₂ proche l'une de l'autre. Celle relative au système se basant sur le BREF est quant à elle supérieure. Cela peut s'expliquer par l'utilisation presque double du charbon dans ce cas.

En ce qui concerne les systèmes CBR Lixhe et SimaPro7.1, la quantité de déchets n'est pas la même, tout comme la nature et la proportion des divers combustibles fossiles. La quantité de CO₂ produite sera difficile à comparer en détails, et tirer des conclusions serait un peu délicat en ce qui concerne ce polluant, vu que nous ne connaissons pas tous les éléments intervenant ici.

Ressources

Les ressources utilisées par les trois différents systèmes sont le charbon noir, le charbon brun, le gaz naturel ainsi que le pétrole brut. Nous avons vu précédemment pour le système SimaPro7.1 que les combustibles fossiles utilisés étaient entre autres le fuel lourd, le fuel léger et le coke de pétrole. Ces trois combustibles seront pris en compte avec l'impact du pétrole brut.

Les résultats concernant les scores caractérisés des différentes ressources sont présentés à la Figure VII.8.

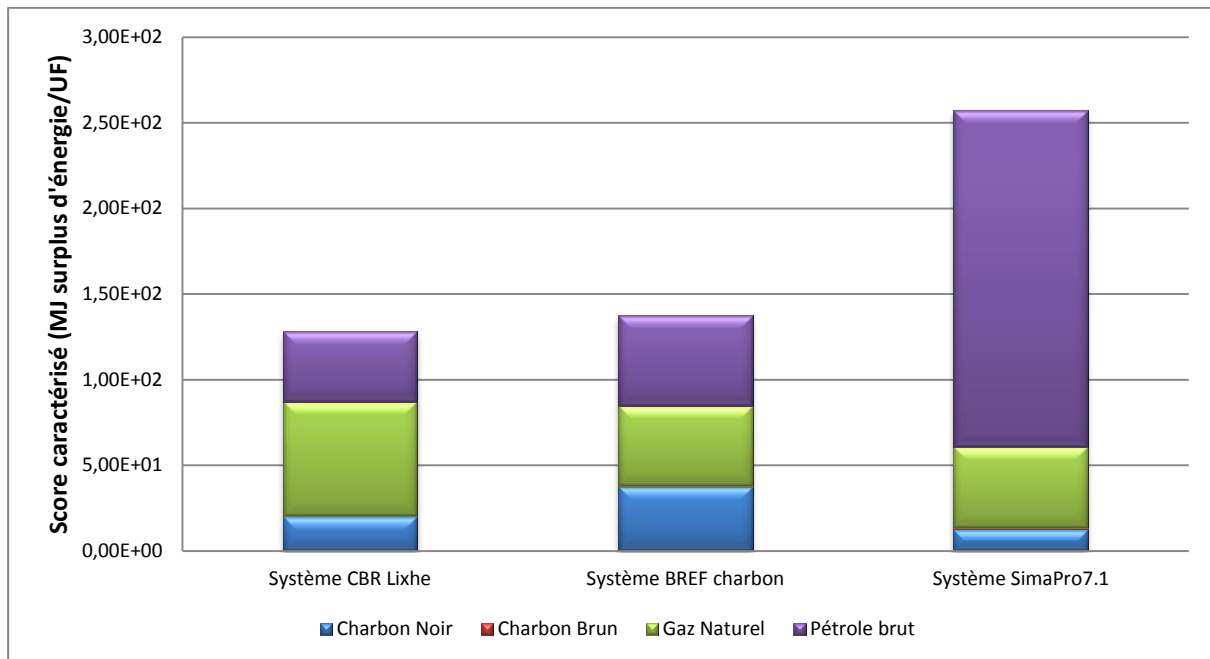


Figure VII.8 Scores de la sous-catégorie ressources pour les différents systèmes envisagés

L'impact des ressources concernant le système SimaPro7.1 est presque double par rapport aux autres systèmes. Ceci s'explique par la consommation plus importante de pétrole brut dans ce cas. En effet, ce dernier possède un facteur d'impact 20 fois supérieur à celui du charbon dans la perspective envisagée, ce qui explique la différence notable.

Le gaz naturel est utilisé en proportion plus faible que le charbon noir et brun additionné, mais il possède également un facteur d'impact 20 fois plus élevé que ceux du charbon.

Nous voyons donc, que pour une même consommation énergétique, la nature des combustibles fossiles utilisés va influencer fortement les impacts associés.

VII.1.2. Scores pondérés des étapes constituant les systèmes envisagés

Lors de ce chapitre, nous allons envisager le poids des différentes étapes présentes dans chacun des systèmes afin d'y déceler la cause principale du score global. Nous envisagerons le système CBR Lixhe ainsi que le BREF charbon. Nous illustrerons le système SimaPro7.1 à titre d'exemple. En effet, dans celui-ci, il nous sera impossible de séparer le four, du transport et du broyage. Nous pourrions simplement comparer l'étape globale, débouchant à la fabrication de ciment, à la production d'électricité par deux moyens distincts et simultanés.

VII.1.2.1. Système CBR Lixhe

En ce qui concerne ce système, nous allons envisager le poids respectif des étapes suivantes :

- L'extraction des matières premières et des combustibles fossiles, ainsi que l'étape de calcination et clinkérisation dans le four seront dénommées Four.
- Le transport des matières premières de substitution et des combustibles de substitution sera dénommé Transport 1.
- Le broyage du clinker et l'extraction des additifs seront dénommés Mouture.

- Le transport des additifs sera dénommé Transport 2.
- La production d'électricité par centrale électrique sera dénommée Electricité.

La Figure VII.9 représente les parts respectives des différentes étapes envisagées.

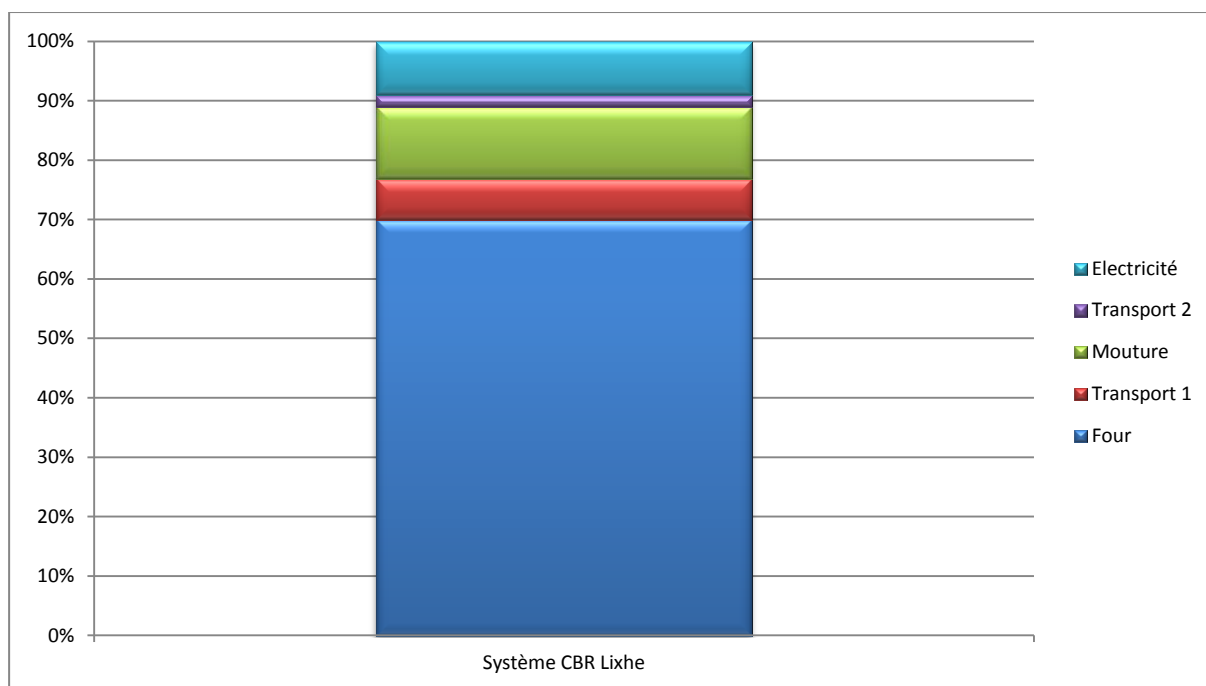


Figure VII.9 Répartition du score global entre les différentes étapes du système CBR Lixhe

Nous pouvons remarquer que la part la plus importante du score sera fournie par l'étape Four. En effet, c'est ce dernier qui a le plus besoin d'énergie, et de matières premières. La seconde étape importante est la mouture, les autres sont moins prépondérantes.

Nous remarquons donc que les étapes entrant le plus en jeu dans le score global sont des étapes nécessaires à la formation du ciment, ce sont des étapes de synthèse.

Le transport quant à lui, n'est pas fort important. Malgré tout, nous remarquons qu'une grosse part de cet impact est due à l'apport des farines animales depuis le sud de la France. Cette distance est, en effet, nettement supérieure aux autres.

Nous pouvons également remarquer que la « perte » d'électricité due à l'utilisation des déchets en cimenterie n'amène pas une forte contribution au score global.

En ce qui concerne les différentes étapes, elles n'affectent pas toutes de la même façon le score global. En effet, certaines seront plus préjudiciables à une catégorie plutôt qu'à une autre. La Figure VII.10 nous présente ces résultats.

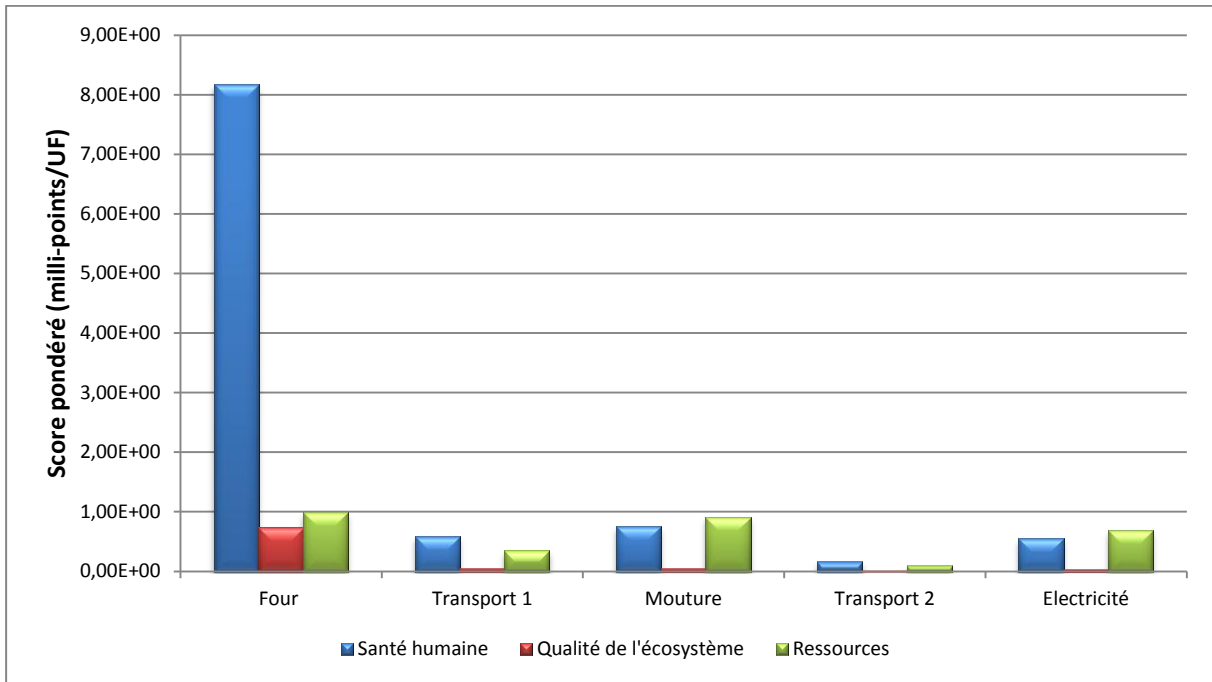


Figure VII.10 Contribution des étapes du système CBR Lixhe aux trois catégories de dommages

Nous remarquons que les différentes étapes affecteront surtout les catégories concernant la Santé humaine et les Ressources. La Qualité de l'écosystème sera finalement peu touchée comme nous l'avions déjà montré précédemment.

L'étape dénommée Four aura l'impact le plus élevé en matière de Santé humaine. A la vue de la Figure VII.10, nous retrouvons bien les constatations précédentes comme quoi le four aura l'impact le plus important, et que la Santé humaine est la catégorie prépondérante dans le score global.

Pour la catégorie relatant la Santé humaine, il n'y a pas de soucis pour remarquer que le Four aura l'impact le plus important. La Figure VII.11 le confirme une nouvelle fois.

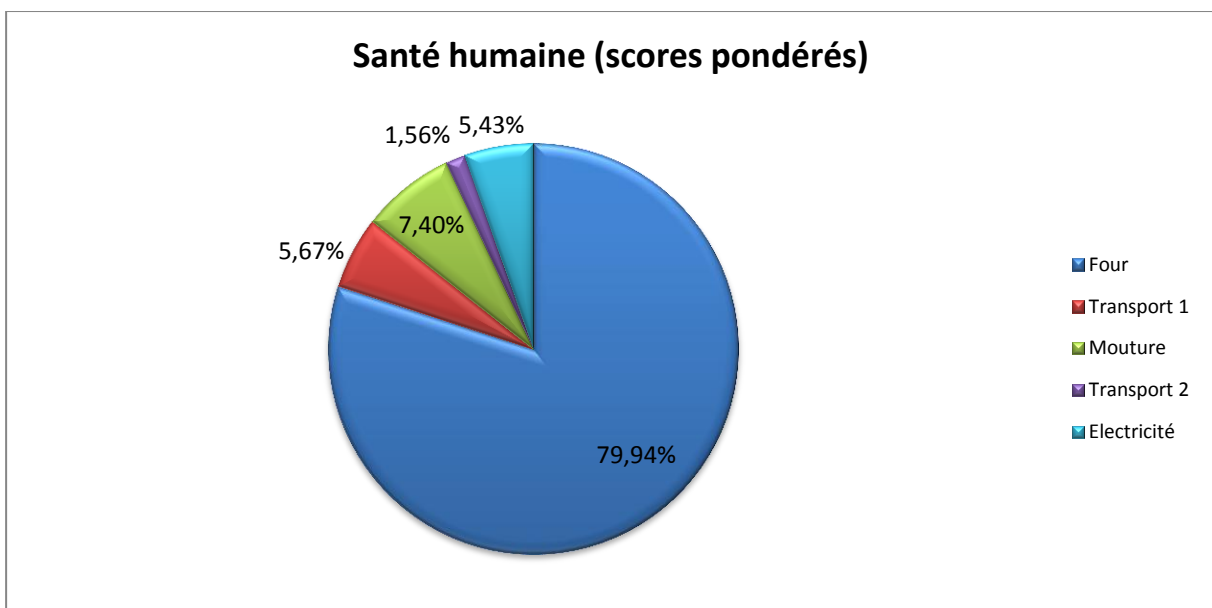


Figure VII.11 Répartition des différentes étapes dans la catégorie « Santé humaine »

Cet impact du Four sur la Santé humaine peut s'expliquer par l'émission forte de CO₂ ainsi que les émissions de substances à effets respiratoires inorganiques et à effets cancérogènes comme nous l'avons montré au paragraphe VII.1.1.1.

En ce qui concerne les autres catégories à savoir « Qualité de l'écosystème » et « Ressources », la répartition est plus difficile à entrevoir sur base de l'unique Figure VII.10. Nous avons un aperçu plus détaillé grâce aux Figure VII.12 et Figure VII.13.

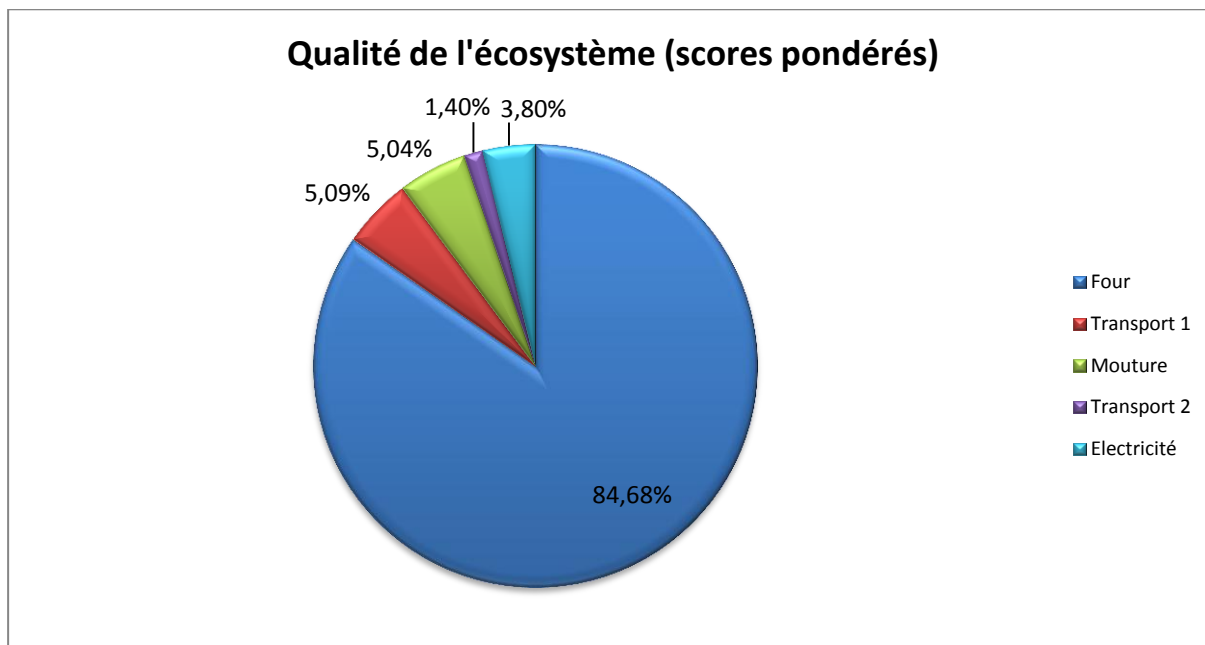


Figure VII.12 Répartition des différentes étapes dans la catégorie « Qualité de l'écosystème »

Nous n'avons pas explicité ces résultats au paragraphe VII.1.1.1 vu le faible apport de cette catégorie au score global. Nous pouvons néanmoins remarquer qu'une fois encore, le Four est responsable d'un grand pourcentage de cet impact.

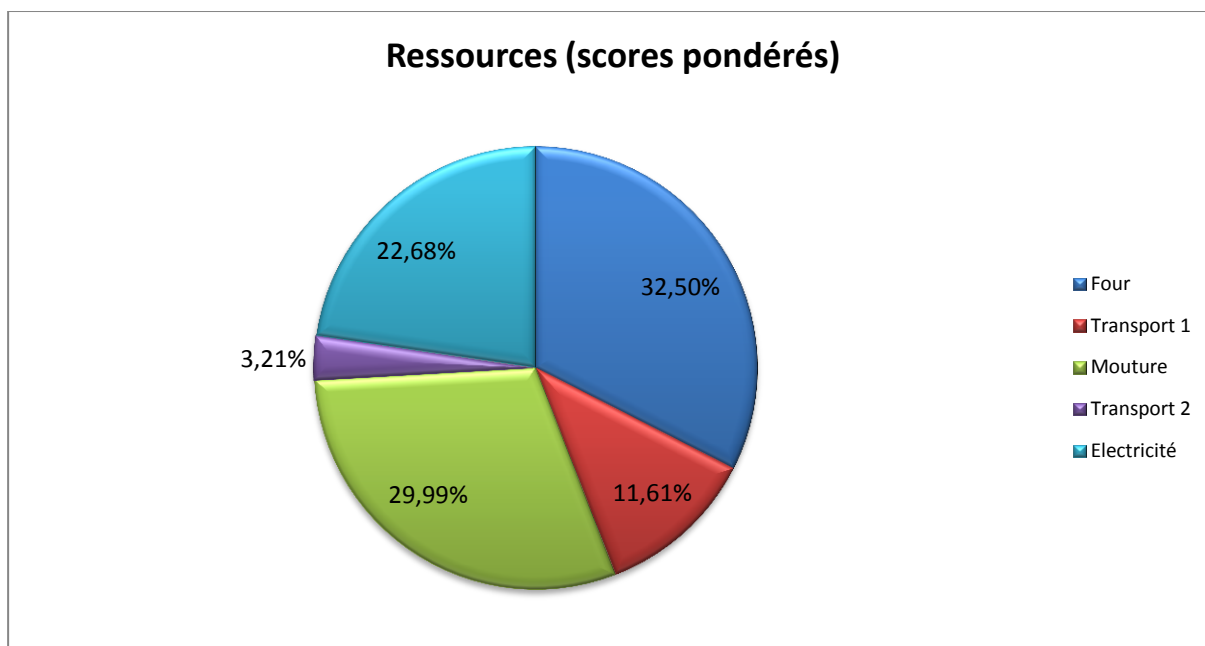


Figure VII.13 Répartition des différentes étapes dans la catégorie « Ressources »

En ce qui concerne les ressources, nous remarquons que la répartition est plus variée. Le Four au sens large du terme consomme le plus grand pourcentage des ressources, mais ce dernier est du même ordre de grandeur que celui nécessaire à la mouture ou encore à la production d'électricité par une centrale électrique consommant le mixte belge avec nucléaire.

VII.1.2.2. Système BREF Charbon

Ce système se basera sur les mêmes étapes que celles explicitées précédemment pour le système CBR Lixhe. Les seules différences seront la provenance de l'électricité, qui ne sera plus produite par une centrale électrique à partir du mixte belge avec nucléaire mais bien à partir de l'incinération des déchets, et le Transport 1 qui comprendra uniquement le transport des matières premières de substitution.

Nous obtenons la répartition en pourcentage des différentes étapes envisagées à la Figure VII.14.

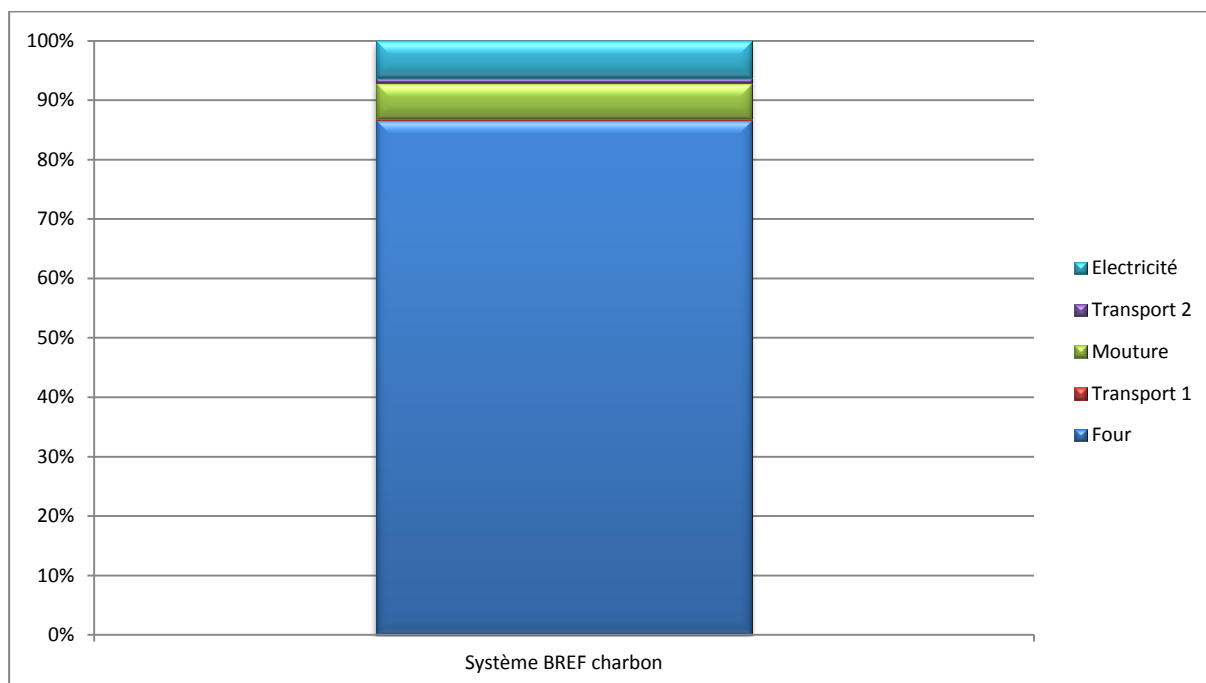


Figure VII.14 Répartition du score global entre les différentes étapes du système BREF charbon

Nous remarquons dans cette figure que l'impact relatif au Four présente un pourcentage supérieur au système précédent. Les constatations sont les mêmes que celles précédemment établies.

Voyons également pour ce système la répartition du score global en fonction des différentes catégories et des différentes étapes. La Figure VII.15 nous en fournit une représentation.

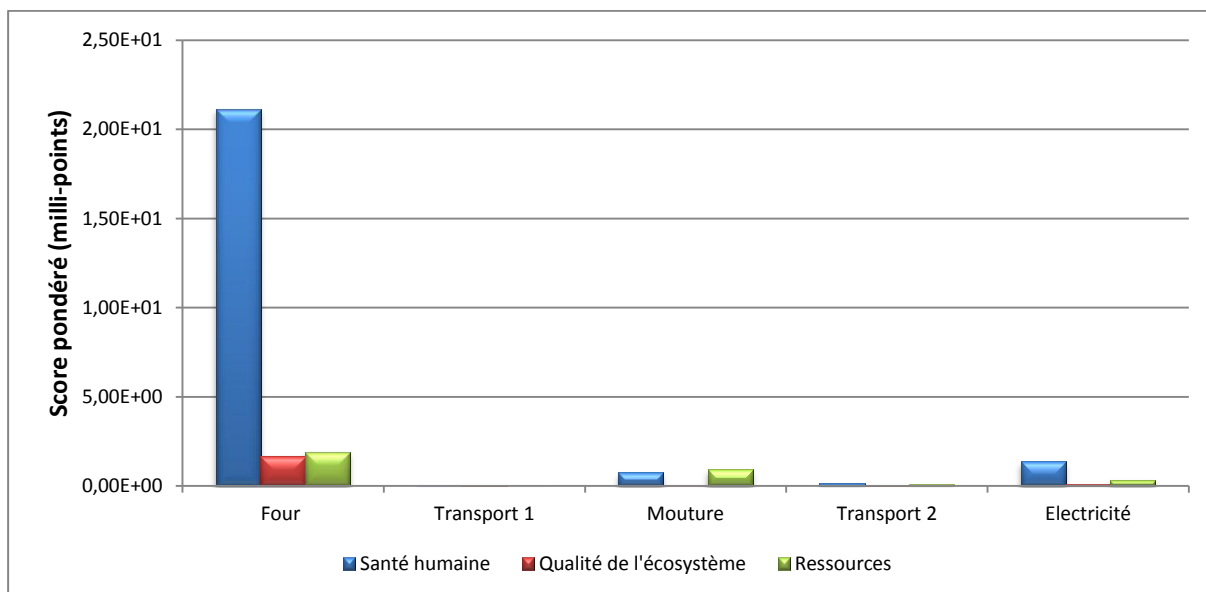


Figure VII.15 Contribution des étapes du système BREF charbon aux trois catégories de dommages

En ce qui concerne le Four, nous remarquons également dans ce système que c'est cette étape qui est la plus dommageable, surtout au niveau de la Santé humaine.

Dans ce système, nous obtenons une quantité plus importante de substances à effets respiratoires inorganiques comme les NO_x et les SO_x, ainsi qu'une quantité de CO₂ émise plus grande que dans le système précédent, due en partie à la consommation plus dense de charbon.

En ce qui concerne les catégories « Santé humaine » et « Qualité de l'écosystème », nous pouvons directement remarquer que le Four est responsable de la plus grande partie de l'impact concernant ces catégories. Les figures illustrant ces pourcentages se trouvent à l'Annexe 11.

Pour la catégorie « Ressources », la répartition sera plus équilibrée comme le montre la Figure VII.16.

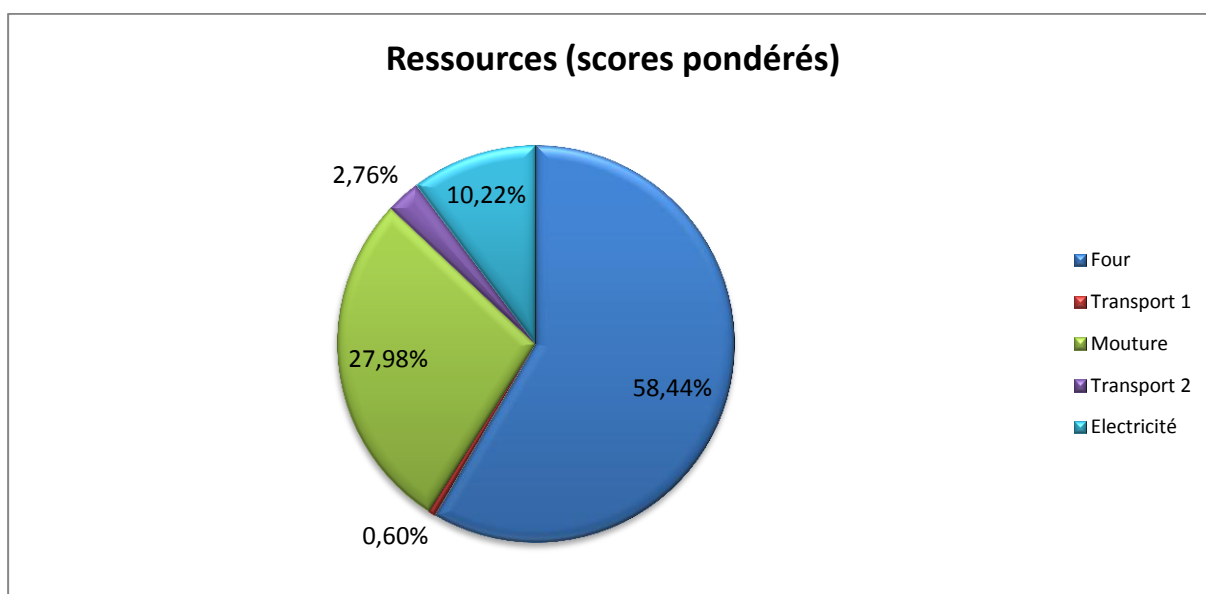


Figure VII.16 Répartition des différentes étapes dans la catégorie « Ressources »

Dans ce système, nous remarquons un pourcentage plus important en ce qui concerne la consommation des ressources par le Four. En effet, dans cette optique, les déchets sont valorisés en incinérateur et plus en cimenterie. Il faut donc amener l'énergie nécessaire à la fabrication du ciment par une autre voie qui se résume être l'utilisation des combustibles fossiles et ici le charbon noir.

La production d'électricité, ici, consommera moins d'énergie fossile. En effet, cette production se base sur la valorisation des déchets, l'énergie fossile nécessaire résultera du transport de ces déchets de leur endroit d'origine à l'incinérateur. Nous avons considéré, comme expliqué précédemment, que les déchets parcouraient la même distance pour être valorisé en cimenterie que pour être incinéré.

Dans ce système, nous remarquons une décroissance de la part des transports, surtout celui concernant les matières premières de substitution et les combustibles de substitution. Ceci s'explique par le fait que le transport est ici imputé à l'incinération plutôt qu'à l'étape transport vers la cimenterie. Ceci semble logique vu que celle-ci n'utilise plus les déchets mais uniquement les matières premières.

Les autres étapes à savoir la mouture et le transport des additifs conservent à peu près le même pourcentage que pour le système CBR Lixhe. En effet, il n'y a pas eu de changements quant à la nature ou la quantité d'électricité ou d'additifs nécessaires à ces étapes.

VII.1.2.3. Comparaison des deux systèmes précédents en termes d'étapes

Nous avons déjà amené quelques sources d'explications quant aux changements de pourcentages de certaines étapes d'un système à l'autre, ou à la prépondérance d'une étape dans le score d'une catégorie en particulier. La Figure VII.17 permet de nous rendre compte des différences d'impact des différentes étapes selon le système envisagé.

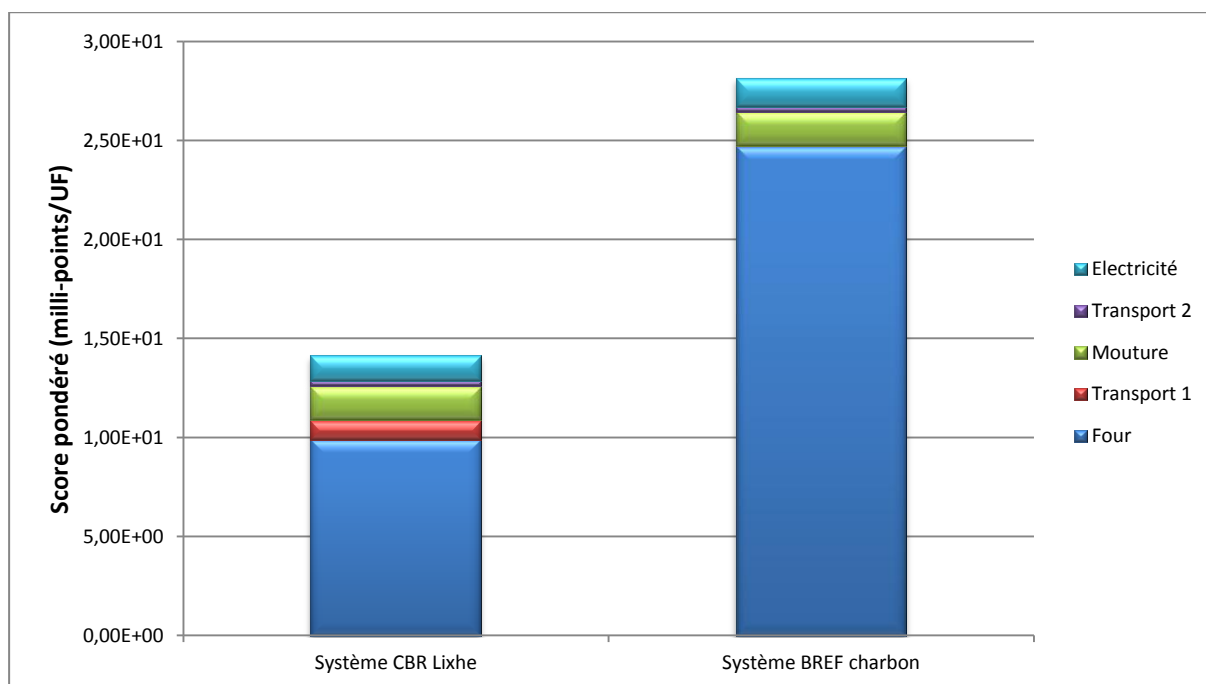


Figure VII.17 Comparaison des étapes des deux systèmes envisagés en termes de scores pondérés

Une ressemblance est visible quant à la répartition des différentes étapes en termes d'apport au score global. Le Four est prépondérant dans les deux systèmes, avec un score plus grand atteint par le système BREF Charbon.

Le point sensible de chacun des systèmes est donc le Four avec ses étapes implicites. Il sera le point crucial à améliorer pour permettre un meilleur score global.

Nous savons que le Four regroupe les étapes d'extraction et de clinkérisation. Réduire les émissions dues aux étapes d'extraction n'est possible qu'en diminuant la quantité extraite. Nous pouvons donc avancer que le fait d'utiliser des déchets permet d'éviter une extraction supplémentaire de combustibles fossiles et de cette manière réduire l'impact.

En ce qui concerne les émissions du four de cimenterie, il faudrait évidemment réduire aux maximums les émissions les plus importantes, et les plus prépondérantes dans l'impact. Ceci peut s'envisager grâce à l'apport des techniques évoquées au paragraphe IV.2.1.

VII.1.2.4. Système SimaPro7.1

Comme nous l'avons expliqué plus haut, il sera inutile de comparer les étapes de ce système aux autres, vu le peu de détails obtenu ici. Nous pourrions simplement comparer les étapes de fabrication du ciment ainsi que de production d'électricité pour les trois systèmes.

Nous allons, tout d'abord, illustrer les pourcentages respectifs obtenus par les trois étapes présentes ici, à savoir la production d'une tonne de ciment, la production d'électricité par centrale électrique et celle par incinération.

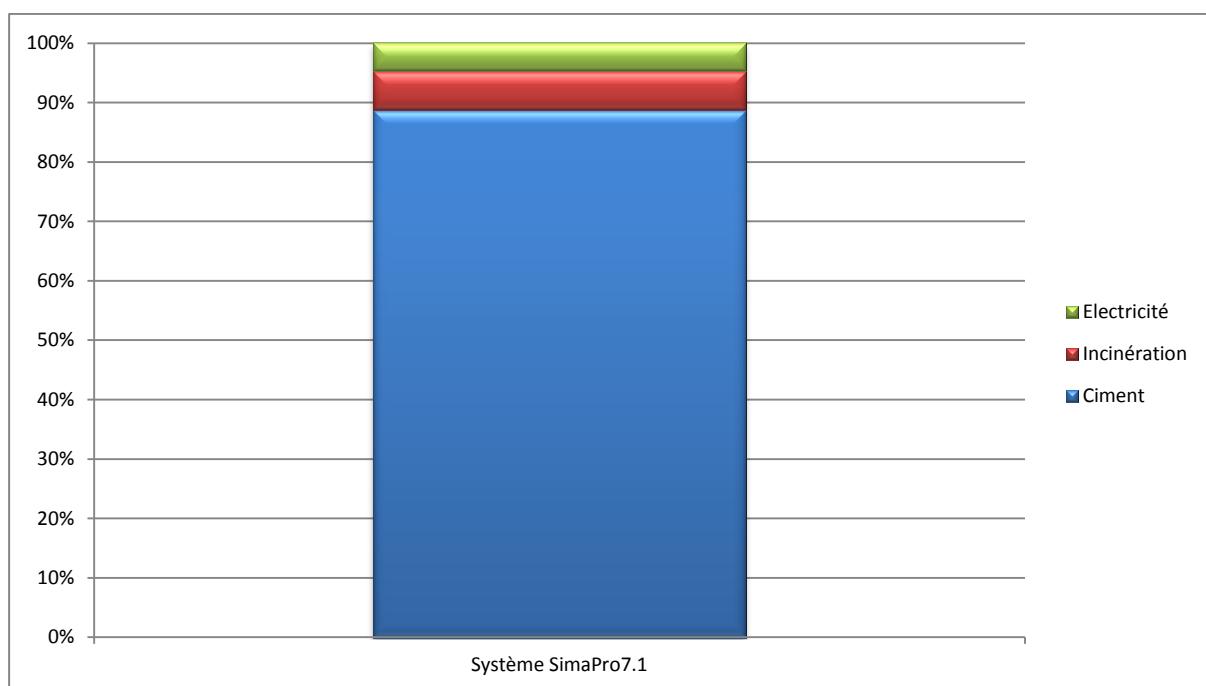


Figure VII.18 Répartition du score global entre les différentes étapes du système SimaPro7.1

Nous voyons à partir de la Figure VII.18, que la fabrication du ciment est encore une fois la partie la plus importante en ce qui concerne le score global. Comme nous l'avons dit, vu le peu de détails de ce système, nous ne pouvons dire quelle étape est prépondérante, bien qu'en toute logique et vu les autres résultats, nous pouvons nous douter qu'il s'agit du Four.

Le pourcentage concernant l'électricité est plus grand que celui concernant l'incinération. Ceci peut se comprendre par le fait que sur les 98,95 kg de déchets au départ à valoriser, plus de 65 % de ces derniers sont valorisés en four de cimenterie. Les 35 % restant doivent être incinérés.

Nous remarquons également que le pourcentage concernant la production d'électricité est ici relativement proche du pourcentage obtenu pour le système CBR Lixhe.

Les scores pondérés obtenus par les trois systèmes en termes de production de ciment et de production d'électricité se trouvent dans le Tableau VII.1.

Etapes envisagées	Système CBR Lixhe	Système BREF charbon	Système SimaPro7.1
Ciment	1,29E+01	2,67E+01	1,57E+01
Electricité	1,28E+00	1,79E+00	1,99E+00

Tableau VII.1 Scores pondérés des deux principales étapes pour les trois systèmes envisagés

VII.2. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité peut être réalisée au niveau des frontières du système étudié ou au niveau de la méthodologie développée dans Eco-Indicator 99.

VII.2.1. Sensibilité du système

Dans cette partie de l'analyse de sensibilité, nous allons nous focaliser sur le changement des émissions du four de clinkérisation. Ces données étaient fournies par l'usine CBR Lixhe en ce qui concerne le premier système et par le BREF Ciment et Chaux de 2001 pour le deuxième système n'utilisant que du charbon.

Dans ce paragraphe, nous n'utiliserons pas le système se basant sur le logiciel SimaPro7.1. En effet, ce ne serait pas scientifiquement correct, vu le peu de données recueillies en ce qui concerne les différentes étapes prises en compte, le poids de chaque étape en ce qui concerne les émissions, etc.

Nous aurions également pu nous baser sur d'autres hypothèses effectuées comme celles concernant le transport, les pourcentages de la quantité globale pour le chrome (VI) et les poussières ou encore la quantité de fumées produites par l'incinération des déchets. Au vu des résultats présentés au paragraphe VII.1, nous pouvons remarquer qu'un changement de ces valeurs n'aurait pas influencé le score global de façon notable.

VII.2.1.1. Système CBR Lixhe

Pour les résultats précédemment obtenus, nous avons utilisé les données moyennes en ce qui concerne les émissions du four de cimenterie. Nous allons désormais voir ce que cela changerait si nous utilisions les valeurs minimales ou maximales obtenues, et quels seront alors les paramètres clés à gérer pour avoir le meilleur score global possible.

Le système utilisant les valeurs minimales de CBR sera appelé CBR Lixhe Bas, celui utilisant les valeurs maximales, CBR Lixhe Haut, et le dernier utilisant les valeurs déjà employées précédemment dans le travail sera appelé CBR Lixhe Moyen.

Le Tableau VII.2 donne les scores pondérés pour les différentes catégories ainsi que le score global.

Systèmes envisagés	Santé humaine	Qualité de l'écosystème	Ressources	Total
CBR Lixhe Moyen	1,02E+01	8,69E-01	3,05E+00	1,41E+01
CBR Lixhe Bas	9,52E+00	7,03E-01	3,05E+00	1,33E+01
CBR Lixhe Haut	1,12E+01	1,13E+00	3,05E+00	1,53E+01

Tableau VII.2 Scores pondérés des différents systèmes CBR envisagés

Au vu de ces résultats, nous constatons que les impacts concernant les ressources ne varieront pas ce qui est évident vu que la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication n'a pas changé. Les deux autres catégories vont, elles, par contre varier. Nous allons donc nous intéresser aux sous-catégories de la « Santé humaine » et de la « Qualité de l'écosystème » afin de déterminer lesquelles seront le plus influencées par des changements.

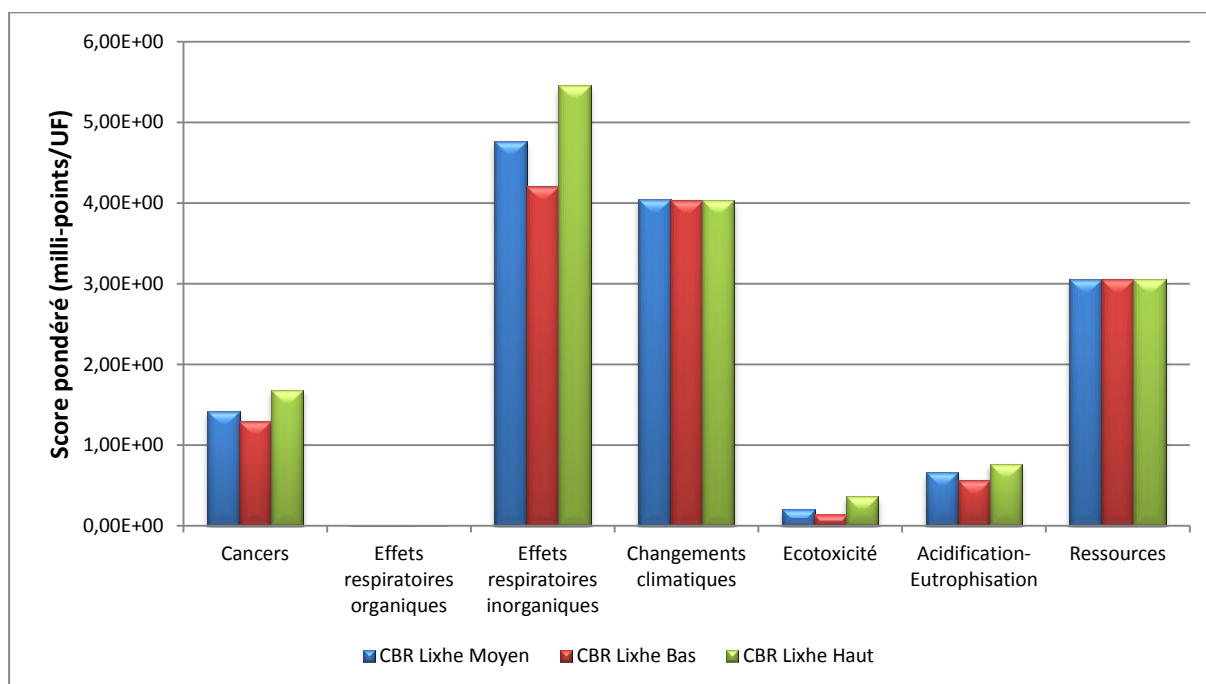


Figure VII.19 Scores pondérés des différentes sous-catégories pour les systèmes CBR envisagés

Nous pouvons remarquer que nous avons toujours le même ordre en ce qui concerne les sous-catégories. Les quatre principales sont toujours les effets respiratoires inorganiques, les changements climatiques, les ressources et les cancers.

Nous remarquons que deux d'entre elles n'ont pas bougé quelque soit le système envisagé ici. En effet, en ce qui concerne les ressources, nous avons déjà expliqué que la quantité

d'énergie utilisée n'a pas varié. Pour la catégorie des changements climatiques, nous avons vu précédemment que le principal responsable du score de cette sous-catégorie était le dioxyde de carbone (CO₂). Ce dernier a été calculé sur base de la teneur en carbone des combustibles fossiles, des combustibles de substitution ainsi que de la réaction de décarbonatation. Ces émissions sont indissociables du procédé et nous avons estimé en première hypothèse qu'elles ne varieraient pas. En effet, des techniques de capture du CO₂ dans les fumées sont possibles mais très lourdes d'un point de vue des investissements et des frais opératoires, le rendement énergétique s'en trouvant également réduit. Ces techniques sont par exemple l'adsorption physique, chimique ou physico-chimique, ou encore les séparations par membranes.

Pour les deux autres sous-catégories, à savoir les cancers et les effets respiratoires inorganiques, nous remarquons que les changements sont minimes. En effet, le changement des données s'est uniquement porté sur les émissions dans l'air. Les valeurs caractérisées des différents polluants participant à l'impact de ces sous-catégories sont présentées dans les Tableau X.54 et Tableau X.55 à l'Annexe 12. La configuration des polluants pour ces deux sous-catégories se présentent de la même façon que lors de l'analyse effectuée au paragraphe VII.1.1.1.

Au vu de ces analyses, nous pouvons remarquer qu'utiliser les valeurs moyennes fournies par la CBR n'entraîne pas d'erreurs majeures. Il y aura une certaine différence quant au score global, mais finalement, celui-ci pourra varier au maximum 1,22 milli-points par rapport à la valeur donnée antérieurement.

VII.2.1.2. Système BREF Charbon

Pour ce système, nous allons analyser les différences pouvant être obtenues en ce qui concerne le score global si nous utilisons les bornes fixées par le BREF Ciment et Chaux de 2001. Afin de compléter notre analyse, nous comparerons également le score obtenu sur base d'une moyenne des émissions provenant du BREF 2001, et d'une moyenne des émissions provenant alors du Draft de septembre 2007. Ces valeurs sont à titre indicatif, en effet, elles n'ont pas encore été validées officiellement.

Les différents systèmes envisagés seront appelés respectivement BREF moyen, BREF bas, BREF haut et Draft selon qu'ils utilisent les valeurs moyennes du BREF de 2001, les bornes inférieures du BREF de 2001, les bornes supérieures du BREF de 2001 ou les valeurs moyennes calculées à partir du le Draft de 2007.

Les scores pondérés des trois catégories ainsi que le score global se trouvent dans le Tableau VII.3.

Systèmes envisagés	Santé humaine	Qualité de l'écosystème	Ressources	Total
BREF moyen	2,34E+01	1,81E+00	3,27E+00	2,85E+01
BREF bas	1,09E+01	5,50E-01	3,27E+00	1,47E+01
BREF haut	3,60E+01	3,07E+00	3,27E+00	4,23E+01
Draft	2,45E+01	2,27E+00	3,27E+00	3,00E+01

Tableau VII.3 Scores pondérés des différents systèmes BREF Charbon envisagés

L'utilisation des bornes va modifier grandement les scores globaux obtenus. Ils vont varier de 14,7 à 42,3 milli-points ce qui est énorme comparé à la variation rencontrée par le système CBR Lixhe.

Ce sont encore une fois les impacts des deux catégories « Santé humaine » et « Qualité de l'écosystème » qui vont varier et non celui concernant la catégorie « Ressources ». Ceci s'explique une nouvelle fois par le fait que la nature et la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication d'une tonne de ciment et à l'incinération des déchets sont restées constantes. Seules les émissions dans l'air ont changé.

Nous allons dans un premier temps comparer les résultats obtenus en employant les bornes inférieures et supérieures du BREF de 2001, ainsi qu'une moyenne de ces émissions et nous comparerons par la suite la différence entre les valeurs moyennes du BREF de 2001 et celles du Draft de 2007.

VII.2.1.2.1. Comparaison des valeurs données dans le BREF de 2001.

La Figure VII.20 représente les scores pondérés des différentes sous-catégories pour les trois systèmes envisagés.

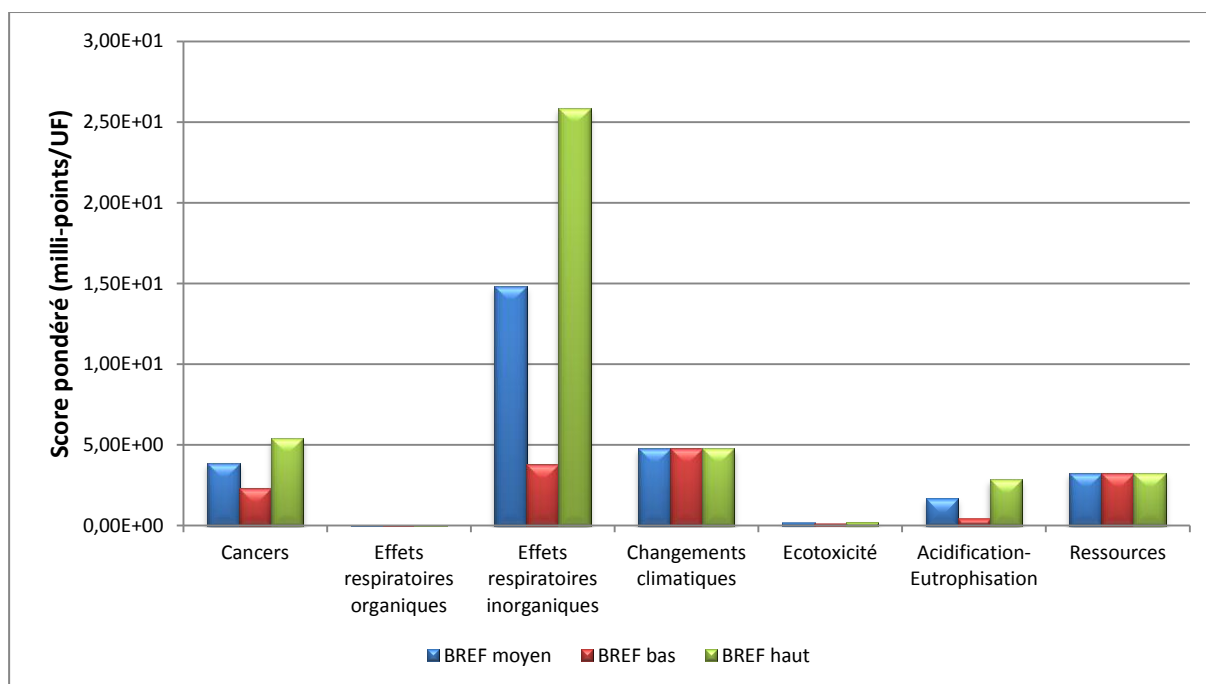


Figure VII.20 Scores pondérés des différentes sous-catégories pour les systèmes du BREF envisagés

En ce qui concerne les sous-catégories « Changements climatiques » et « Ressources », nous n'observons pas de changement. En effet, nous avons déjà expliqué pourquoi en ce qui concerne les ressources, et pour les changements du climat, nous avons la même constatation que pour le système CBR précédent, à savoir que l'impact le plus important dans cette catégorie est dû au dioxyde de carbone et que la quantité de ce dernier a été calculée sur base de la teneur en carbone des différents combustibles présents ainsi que sur base de la réaction de décarbonatation, réaction indissociable à l'obtention du clinker.

La sous-catégorie qui sera le plus affectée par ce changement est celle regroupant les effets respiratoires inorganiques. En effet, la quantité des composés soufrés varie fortement, tout

comme celle relative aux composés azotés. Le poids de cette sous-catégorie sera très important en ce qui concerne le score global. En effet, elle peut atteindre plus de 25 milli-points pour le système BREF Haut, contre moins de 5 milli-points pour le système BREF Bas.

Grâce à cette sous-catégorie, nous pouvons remarquer l'importance essentielle des installations permettant la réduction des émissions de ces deux composés à savoir les NO_x et les SO_x.

Pour la sous-catégorie concernant les cancers, le changement d'impact sera principalement dû aux dioxines. Elles deviennent prédominantes lors du dernier système envisagé, le BREF haut, le chrome (VI) dans l'eau passe alors au second plan pour ce système.

En ce qui concerne l'acidification et l'eutrophisation, seuls trois polluants sont pris en compte, à savoir l'ammoniac (NH₃), les composés azotés (NO_x) et les composés soufrés (SO_x). Ces émissions ont lieu dans l'air. Nous pouvons remarquer que ce sont exactement les mêmes polluants responsables de l'apport au score de cette sous-catégorie que ceux de la sous-catégorie « Effets respiratoires inorganiques ». Une diminution de ces deux polluants (NO_x et SO_x), permettra, en plus de diminuer l'impact dû aux effets respiratoires inorganiques, de diminuer l'impact dû à l'acidification-eutrophisation. Une réduction de ces polluants aura dès lors, deux effets positifs liés.

Les affirmations précédentes se basent sur les Tableau X.57 et Tableau X.58 ainsi que sur la Figure X.4 présentés à l'Annexe 12.

Conclusions

Nous pouvons remarquer que l'utilisation des bornes du BREF de 2001 entraîne de grandes modifications dans le score global, surtout en ce qui concerne les composés NO_x et SO_x. L'utilisation des bornes minimales nous amènerait à un score de l'ordre de celui obtenu pour le système CBR Lixhe. L'hypothèse utilisée ici peut être remise en cause, mais vu la fourchette des émissions fournies, choisir l'une ou l'autre borne aurait été de considérer que le système utilisant du charbon était particulièrement très mauvais ou très bon, ce que nous ne pouvons affirmer. Nous avons dès lors modélisé une cimenterie qui se situe dans la moyenne européenne des cimenteries actuelles.

VII.2.1.2.2. Comparaison des valeurs moyennes du BREF de 2001 et du Draft de 2007

Dans ce paragraphe, nous allons comparer les valeurs moyennes de deux versions plus ou moins récentes du BREF, tout en gardant à l'esprit que les valeurs du Draft n'ont pas encore été validées et ne sont là qu'à titre indicatif, afin de voir les changements obtenus dans les différentes cimenteries selon les nouvelles techniques employées.

Le Tableau VII.4 donne les scores pondérés des différentes catégories ainsi que le score global.

Systèmes envisagés	Santé humaine	Qualité de l'écosystème	Ressources	Total
BREF Moyen	2,34E+01	1,81E+00	3,27E+00	2,85E+01
Draft	2,45E+01	2,27E+00	3,26E+00	3,00E+01

Tableau VII.4 Scores pondérés des systèmes BREF Moyen et Draft

Nous pouvons remarquer que les valeurs ne changent pas énormément. Par contre, nous constatons une augmentation des quantités relevées pour différents polluants, ce qui amène un score global plus élevé dans le cas du Draft que pour le BREF Moyen. Nous aurions pu nous attendre à la conclusion inverse, en nous disant qu'en 5 ans, les meilleures techniques auraient été installées et conduit à une diminution sensible du résultat. Il n'en est rien d'après les chiffres proposés dans le Draft de septembre 2007.

La Figure VII.21 nous montre les changements en ce qui concerne les sous-catégories.

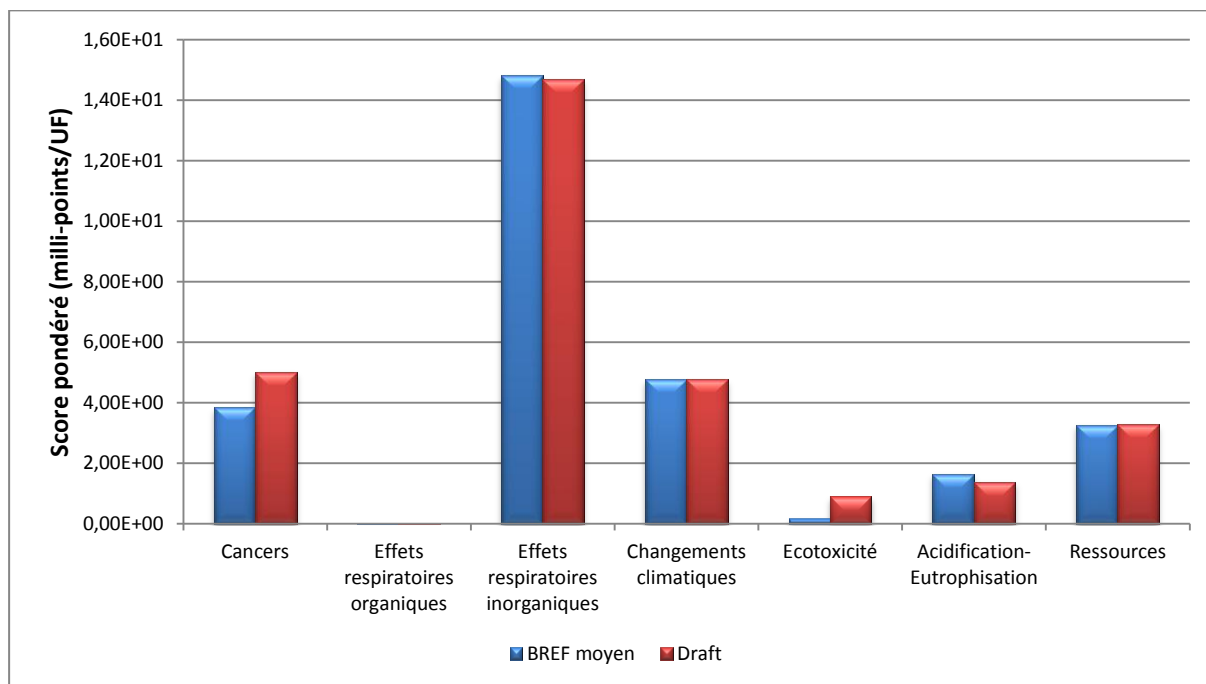


Figure VII.21 Scores pondérés des sous-catégories pour les systèmes BREF Moyen et Draft

Suite à la Figure VII.21, nous pouvons remarquer, comme précédemment, que les sous-catégories « Changements du climat » et « Ressources » ne subiront pas de variation pour les raisons évoquées dans les systèmes précédents.

Les sous-catégories prédominantes lors du système BREF moyen le restent également dans le système Draft. Nous pouvons constater une légère diminution pour les sous-catégories « Effets respiratoires inorganiques » ainsi qu'« Acidification – Eutrophisation ». Une augmentation assez nette est réalisée en ce qui concerne les scores des sous-catégories « Effets cancérogènes » et « Eco-Toxicité ».

Les résultats obtenus pour la section « Effets cancérogènes », pourront également être reliés à la variation du score obtenu pour la sous-catégorie « Eco-Toxicité ». En effet, cette dernière prend surtout en compte les émissions de métaux lourds dans l'air, dans l'eau et dans le sol. Les polluants évoqués sont à peu près les mêmes, et nous pourrions donc considérer que les constatations effectuées dans le cadre de la sous-catégorie « Effets cancérogènes » pourront également y être appliquées.

Dans les données du Draft, il y a eu un remaniement de l'apport des polluants à effets cancérogènes. En effet, ceux émis dans l'air contribueront plus à l'apport du score de cette sous-catégorie que lors du système BREF Moyen.

Nous obtiendrons un apport assez important de cadmium dans l'air, nouvellement pris en compte dans ce système. D'autres polluants comme le nickel dans l'air et le chrome verront leur quantité émise augmenter ce qui mènera également à un impact croissant. Les dioxines, quant à elles, seront toujours présentes mais en quantité moindre, ce qui réduira leur impact.

Ces différentes constatations se basent sur la Figure X.5 ainsi que sur les scores caractérisés se trouvant dans le Tableau X.57 à l'Annexe 12.

Pour la sous-catégorie « Effets respiratoires inorganiques », nous obtenons une légère diminution due à la réduction de la quantité de NO_x émise. Par contre, en ce qui concerne les SO_x, nous pouvons assister à une augmentation qui compensera la réduction précédemment évoquée.

Nous avons également vu, que ce sont les mêmes polluants responsables du score de la sous-catégorie « Acidification-Eutrophisation », le coefficient des composés azotés (NO_x) étant plus important, ceci explique la diminution du score obtenu.

Ces différentes constatations se basent sur la Figure X.6 et sur les scores caractérisés se trouvant dans le Tableau X.58 à l'Annexe 12.

Conclusions

L'utilisation des émissions reprises dans l'un ou l'autre document ne vont pas modifier de façon aussi grande les scores globaux obtenus que lors de l'utilisation des bornes. Nous voyons que malgré l'avancement des technologies, les valeurs des émissions obtenues se retrouvent dans la même gamme, et ne sont pas forcément meilleures.

VII.2.2. Sensibilité de la méthode

Nous testerons la sensibilité de la méthode Eco-Indicator 99 en examinant les variations des éco-scores obtenus suite aux modifications des facteurs de pondération selon les perspectives envisagées.

Dans ce paragraphe, nous envisagerons les différences obtenues entre les systèmes selon la perspective. Pour ce faire, nous utiliserons le score pondéré en milli-points/unité fonctionnelle (UF).

Le Tableau VII.5 présente le score global obtenu pour chaque système selon la perspective envisagée.

Perspective envisagée	Système CBR	Système BREF Charbon	Système SimaPro7.1
Hiérarchiste	1,41E+01	2,85E+01	1,83E+01
Egalitaire	1,64E+01	3,21E+01	1,79E+01
Individualiste	1,48E+01	2,92E+01	1,78E+01

Tableau VII.5 Scores pondérés des différents systèmes selon la perspective envisagée

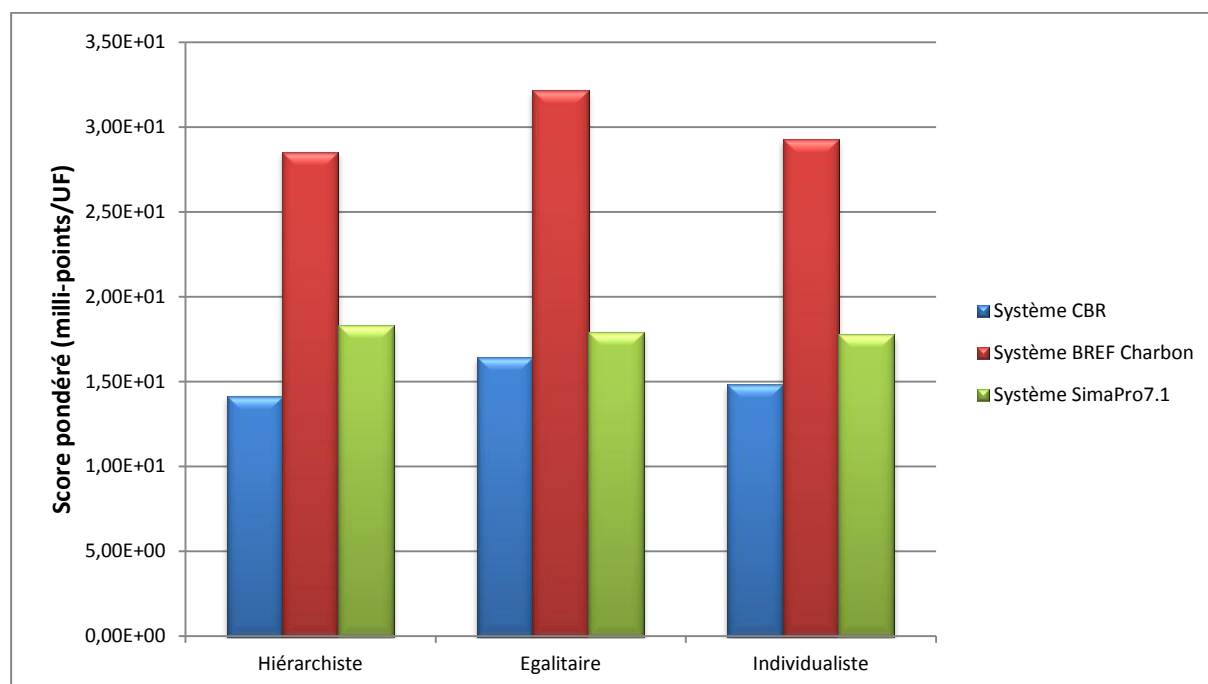


Figure VII.22 Scores pondérés des différents systèmes en fonction de la perspective envisagée

Nous pouvons remarquer que les différentes perspectives n'influenceront pas de façon importante les scores globaux obtenus. Comme le montre la Figure VII.22, aucun ordre préalablement établi n'a été modifié. Le système CBR Lixhe obtient toujours le meilleur score pondéré, suivi du système SimaPro7.1 et enfin du système BREF Charbon.

Les variations des scores pour chaque perspective peuvent être analysées en fonction des catégories. Les scores pondérés de chaque système se trouvent à l'Annexe 13 dans le Tableau X.59.

A l'aide des Figure X.7 et Figure X.8, nous pouvons alors remarquer qu'en ce qui concerne la perspective égalitaire, que ce soit du charbon ou du fuel, un méga joule utilisé est un méga joule perdu, et ceci est la raison pour laquelle la catégorie « Ressources » est augmentée par rapport à la perspective hiérarchiste. La catégorie « Santé humaine » aura également un poids moindre que lors de la perspective précédente, les facteurs de pondération n'étant pas identiques.

L'individualiste, par contre, ne se préoccupe pas des combustibles fossiles, et il n'y a donc aucun impact pour la catégorie « Ressources ». La Santé humaine, est ici, au cœur des préoccupations et le poids accordé est plus élevé que dans les autres perspectives.

Malgré les différences observées pour les catégories, nous pouvons affirmer, à la suite de la Figure VII.22 et du Tableau VII.5 que la méthode Eco-Indicator 99 proposera la même gamme de scores pondérés quelle que soit la perspective utilisée, ce qui justifie la pertinence des coefficients de pondération utilisés.

CHAPITRE VIII. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

VIII.1. Conclusions

Ce travail avait pour but d'établir l'analyse LCA de trois systèmes de production de ciment utilisant des taux différents de substitution des combustibles fossiles ainsi que de comparer les résultats obtenus. La méthodologie utilisée est conforme aux normes ISO 14040-14043.

Nous avons envisagé trois systèmes distincts :

- Le système CBR Lixhe se basant sur les données techniques de 2006 de l'usine CBR Lixhe. Il utilise les combustibles de substitution pour plus de 50 % des besoins en énergie du four de clinkérisation.
- Le système BREF charbon qui est une modélisation d'une cimenterie se basant sur les émissions du document BREF Ciment et Chaux de 2001. Il utilise uniquement des combustibles fossiles, à savoir du gaz naturel et du charbon noir.
- Le système SimaPro7.1 qui utilise la base de données Ciment de Portland du logiciel SimaPro7.1. La valorisation de déchets est prise en compte mais dans un pourcentage moindre que pour le système CBR Lixhe.

Malgré l'utilisation des documents fournis, certaines hypothèses ont du être formulées afin de prendre en compte les différents paramètres nécessaires pour permettre une comparaison correcte entre les systèmes.

L'unité fonctionnelle a été choisie sur base du produit principal à fabriquer, le ciment, mais également sur base de la valorisation de déchets. Elle comprendra donc la production d'une tonne de ciment, la valorisation de déchets ainsi que la production d'électricité.

L'électricité fut rajoutée à cette dernière sur base du système BREF Charbon. En effet, dans ce système, nous valorisons les déchets en incinérateur et plus en cimenterie, ceux-ci vont alors produire de l'électricité dont nous devons tenir compte dans les autres systèmes également.

Les différents systèmes préalablement décrits ne comprennent donc pas uniquement l'unité de production de ciment mais également

- une centrale électrique utilisant le mixte belge avec nucléaire afin de produire l'électricité requise pour le système CBR Lixhe.
- un incinérateur afin de valoriser les déchets non utilisés en cimenterie dans le système BREF Charbon.
- une centrale électrique utilisant le mixte belge avec nucléaire ainsi qu'un incinérateur pour le système SimaPro7.1. En effet, ce dernier valorise une partie de déchets en cimenterie mais moindre que le système CBR Lixhe. Ces deux unités servent à prendre cette différence en compte.

Les déchets utilisés dans cette étude sont au nombre de trois : les pneus, les sciures imprégnées et les farines animales. Ceux-ci ont été choisis sur base du rapport

environnemental de CBR Lixhe. La quantité à valoriser fut également calculée grâce à cette référence.

Nous allons maintenant nous référer aux scores pondérés obtenus dans la perspective Hiérarchiste. Nous savons que ces résultats sont relativement subjectifs mais ils seront néanmoins utilisés à titre indicatif, afin d'illustrer nos conclusions.

L'analyse LCA fournit une valeur de 14,15 milli-points pour le système CBR Lixhe, 29,62 milli-points pour le système BREF charbon et 17,93 milli-points pour le système SimaPro7.1.

Pour chacun des systèmes envisagés, ce sera la catégorie « Santé humaine » qui sera la plus touchée. Elle représente 72,3 %, 82,2 % et 62,6 % respectivement pour les systèmes CBR Lixhe, BREF Charbon et SimaPro7.1. En effet, les sous-catégories concernant les effets respiratoires inorganiques et les changements du climat font partie des plus importantes pour l'apport au score global.

La catégorie « Ressources » aura le second impact le plus important suivi de la catégorie « Qualité de l'écosystème », pour les trois systèmes envisagés.

Les étapes prises en compte pour les systèmes CBR Lixhe et BREF Charbon sont :

- L'extraction des matières premières et des combustibles fossiles, ainsi que l'étape de calcination et clinkérisation dans le four
- Le transport des matières premières de substitution (et des combustibles de substitution pour le système CBR Lixhe)
- Le broyage du clinker et l'extraction des additifs
- Le transport des additifs (et des combustibles de substitution pour le système BREF Charbon)
- La production d'électricité par centrale électrique ou incinérateur

Le système SimaPro7.1 n'a pas été décomposé en étapes vu la globalité de la base de données utilisée.

Pour les deux systèmes impliqués, nous remarquons que le four est l'étape prépondérante pour l'impact environnemental, avec un pourcentage de 70% et de 86,7% respectivement pour les systèmes CBR Lixhe et BREF Charbon. L'importance de cette étape vis-à-vis de l'impact pouvait être attendue. En effet, nous avons vu que ce dernier nécessite un apport de matières premières ainsi que d'énergie assez conséquent. Les combustibles fossiles peuvent apporter l'énergie nécessaire mais également les déchets, comme nous avons pu le voir tout au long de ce travail. L'impact du four de clinkérisation, en ce qui concerne la catégorie « Ressources », sera d'autant plus élevé que le système n'utilise pas de déchets.

Les résultats obtenus et discutés ci-avant résultent d'un grand nombre d'hypothèses. Afin de vérifier la validité de nos systèmes, une analyse de sensibilité a été effectuée sur les systèmes, et sur la méthode.

Une analyse de sensibilité des systèmes a été effectuée pour les systèmes CBR Lixhe et BREF Charbon. Le système SimaPro7.1 n'a pas été abordé, en effet, nous avons simplement utilisé la base de données du logiciel sans effectuer d'hypothèses quant à la production de ciment. Les seules hypothèses pour ce système sont basées sur la production d'électricité par une centrale électrique et un incinérateur ainsi que le transport de ces déchets.

Dans cette analyse, nous avons remplacé les émissions du four précédemment employées par les valeurs minimales et maximales obtenues dans les documents de référence, à savoir le rapport environnemental de 2006 de CBR Lixhe et le BREF Ciment et Chaux de 2001. Une analyse a également été effectuée en prenant en compte les émissions reprises dans le Draft Ciment et Chaux de 2007.

Pour le système CBR Lixhe, l'emploi des valeurs extrêmes ne modifiera que de quelques milli-points le score global. L'utilisation des valeurs moyennes est donc tout à fait justifiée et n'engendrera pas de modifications notables sur les résultats.

L'utilisation des bornes pour les émissions du système BREF Charbon modifie de façon remarquable les valeurs du score global. Les variations les plus notables sont dues aux composés NO_x et SO_x dont la fourchette d'émissions était très large.

Les bornes minimales d'émissions nous amèneraient à un score de l'ordre de celui obtenu pour le système CBR Lixhe. L'hypothèse adoptée ici peut être remise en cause, mais vu la fourchette des émissions fournies, choisir l'une ou l'autre borne aurait été de considérer que le système utilisant du charbon était particulièrement très mauvais ou très bon, ce que nous ne pouvons affirmer. Nous avons dès lors modélisé une cimenterie qui se situe dans la moyenne européenne des cimenteries actuelles.

Nous avons également effectué une analyse de sensibilité de la méthode en appliquant les coefficients des deux autres perspectives à savoir l'Egalitaire et l'Individualiste. Les scores obtenus pour les différentes perspectives ne varient pas énormément entre eux. Les systèmes restent dans le même ordre que celui précédemment obtenu, à savoir le système CBR Lixhe avec le score le plus faible, suivi du système SimaPro7.1 et enfin du système BREF Charbon. Ceci confirme bien le choix judicieux des différents coefficients pour les perspectives envisagées.

Au vu de ces résultats, nous observons que le système CBR Lixhe obtiendra le meilleur score global, dans tous les cas observés et est, dès lors, meilleur que la moyenne des cimenteries européennes. Les techniques mises en place permettent de rester dans les limites du permis d'exploitation qui se situent pour la plupart bien en dessous des bornes maximales fournies par le document BREF Ciment et Chaux de 2001.

Ce système existe réellement et utilise une large proportion de déchets pour couvrir ses besoins énergétiques. Plusieurs raisons à cette utilisation peuvent être avancées.

Tout d'abord, l'utilisation des déchets en cimenterie est devenue monnaie courante depuis quelques années. En effet, l'attrait financier de la valorisation des déchets en cimenterie par la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles et la compensation des producteurs de déchets en aura convaincu plus d'un.

En plus de cet aspect, ces déchets fourniront l'énergie requise au four mais avec des émissions en dioxyde de carbone moindres, ce qui est également intéressant vu les mesures actuellement prises pour la réduction de ce polluant.

A première vue, l'utilisation de combustibles de substitution en cimenterie n'a que des avantages, mais cela n'est pas totalement vrai. Les cimentiers doivent s'assurer de la qualité de leur produit et, avec ce changement de recette, ils doivent renforcer les contrôles qualité. Les autorités les obligent également à se soumettre à des permis d'exploitation plus stricts que lorsqu'ils n'utilisaient pas de déchets.

Le deuxième meilleur score a été obtenu par le système SimaPro7.1, se basant sur le logiciel du même nom. Cette base de données a été utilisée pour permettre une comparaison supplémentaire, mais également pour mettre à jour les différences les plus importantes entre les hypothèses utilisées par le logiciel SimaPro7.1 et une des réalités belges actuelles.

En terme de résultats, nous pouvons remarquer que les scores globaux obtenus par les deux systèmes SimaPro7.1 et CBR Lixhe ne sont pas très différents l'un de l'autre. Les variations déjà pointées du doigt lors de ce travail pour le système SimaPro7.1 sont le taux d'utilisation moindre des déchets comme combustibles de substitution et l'utilisation de dérivés du pétrole plutôt que du charbon.

Le système BREF Charbon, n'utilisant pas de combustibles de substitution et valorisant les déchets en incinérateur, se trouve loin derrière les deux systèmes préalablement évoqués.

Nous pouvons donc conclure que l'utilisation des déchets en cimenterie permet de les éliminer mais également de valoriser leur potentiel énergétique restant. La préférence va à cette méthode, plutôt qu'à l'incinération des déchets, vu le score global moindre obtenu grâce entre autres à des émissions réduites et à une réduction de la consommation de combustibles fossiles.

VIII.2.Perspectives

Les scores globaux des différents systèmes peuvent encore être améliorés. Ces changements permettant de réaliser un meilleur score peuvent passer par diverses méthodes. La réduction des transports, des extractions de matières premières et des combustibles fossiles en font partie et vont permettre de diminuer les émissions de polluants dans l'eau.

Les émissions les plus préjudiciables sont celles provenant du four de clinkérisation. Elles sont surtout liées aux NO_x et SO_x . L'utilisation de techniques de réduction de ces polluants permettra alors de diminuer ces valeurs.

Le choix des combustibles doit également être effectué avec précaution car, comme nous l'avons vu, cette composition va jouer un rôle dans les émissions ainsi que dans la qualité du clinker.

La valorisation des déchets en cimenterie va certainement se faire de plus en plus courante vu les avantages financiers obtenus et la rencontre des objectifs environnementaux. Celle-ci devra s'utiliser d'une façon rationnelle et nous en sommes conscients, ne pourra pas totalement remplacer les combustibles fossiles. Néanmoins, l'utilisation des combustibles de substitution permet la réduction de celle des combustibles fossiles et l'élimination des déchets dans un cadre plus amical pour l'environnement.

CHAPITRE IX. BIBLIOGRAPHIE

Références bibliographiques

- [1] ADEMIAC P. et al., « Relation entre une cendre volante silico-alumineuse et son *charbon* », *Poudres & Grains*, n°15 (3), pp. 35-46, Octobre 2005.
- [2] CAMPAN J., *Comparaison par Analyse du Cycle de Vie des Utilisations du Bioéthanol*, Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, 2007.
- [3] CBR HEIDELBERG CEMENT GROUP, *Installations de Lixhe*, Brochure, 2007.
- [4] CBR INTER-BETON, *Rapport environnemental*, 2006.
- [5] CBR Lixhe, *Données techniques*, 2006.
- [6] CBR Lixhe, *Rapport environnemental*, 2006.
- [7] CD-ROM : SimaPro7.1, PRé-Consultants, 2006.
- [8] CEMBUREAU, *Rapport d'activités*, 2006.
- [9] COMMISSION AMPERE, *Section D : Technologies gaz, gaz-vapeur, charbon et cogénération*, Rapport principal, 2000.
- [10] CORTI A. et LOMBARDI L., «End life tyres : Alternative final disposal processes compared by LCA», *Energy*, n°29, pp. 2089-2108, 2004.
- [11] CTPL (Centre Technique et de Promotion des Laitiers Sidérurgiques), *Laitier de Haut-Fourneau Vitrifié*, Brochure, Avril 2004.
- [12] EUROPEAN COMMISSION, *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*, December 2001.
- [13] EUROPEAN COMMISSION, *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for Waste Incineration*, August 2006.
- [14] EUROPEAN COMMISSION, *Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries*, Draft, September 2007.
- [15] FEBELCEM, *Rapport environnemental de l'industrie cimentière belge*, 2006.
- [16] GÄBEL K. et al, «The design and building of a life cycle-based process model for simulating environmental performance, product performance and cost in cement manufacturing», *Journal of cleaner Production*, n°12, pp. 77-93, 2004.
- [17] HOLCIM France, *Traitement et valorisation des déchets*, Brochure, 2003.
- [18] IEW (Inter Environnement Wallonie), *La co-incinération des déchets en cimenterie*, Août 2007.
- [19] INRS, «Farines animales et risques professionnels : Etats des lieux au 30 juin 2001», *Documents pour le médecin du travail*, n°86, 2^{ème} trimestre 2001.
- [20] JOSA A. et al., «Comparative analysis of the life cycle impact assessment of available cement inventories in the EU», *Cement and Concrete Research*, n°37, pp. 781-788, 2007.

-
- [21] L'HOMME G.A., *Emploi des combustibles*, Notes de cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Année académique 2004-2005.
- [22] LAROUSSE, *Dictionnaire Encyclopédique*, 1993.
- [23] LECOCQ R.; PIRARD S., *Valorisation des déchets en cimenterie. Dossier technique*, Faculté des Science Appliquées, Université de Liège, Belgique, Année académique 2003-2004.
- [24] LECOCQ R.; PIRARD S., *Valorisation des déchets en cimenterie. Modélisation*, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Année académique 2003-2004.
- [25] LEONARD A., *Réduction des polluants en combustion*, Notes de cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, Année académique 2007-2008.
- [26] LÖDEL R., *Risques liés au stockage des farines animales*, Rapport final, Ministère de l'environnement, France, Septembre 1997.
- [27] MIETTENEN P.; HÄMÄLÄINEN R.P., «How to benefit decision analysis in environmental life cycle assessment (L.C.A.)», *European Journal of Operational Research*, n° 102, pp. 279-294, 1997.
- [28] MOKRZYCKI E.; ULIASZ-BOCHENCZYK A., «Alternative fuels for the cement industry», *Applied Energy*, n°74, pp. 95-100, 2003.
- [29] NORMES ISO/FDIS 14040- 14043, 1997.
- [30] PAIRON G., *Le ciment*, CBR Ciment, 1999.
- [31] PEDRON V.; SEMPE C., *Les Farines animales, Synthèse bibliographique*, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France, Mars 2003.
- [32] PRODUCT ECOLOGY CONSULTANTS, *The Eco-Indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Assessment. Methodology Report*, 3rd Edition, 22 June 2001.
- [33] RECYFUEL, *Valorisation de produits industriels*, Conférence Innovation et Technologie de la Transformation des Déchets en Energie, Liège, 24 mai 2007.
- [34] RIHON A-C., *Application de l'analyse de cycle de vie à la gestion de l'eau, depuis le captage jusqu'à l'épuration*, Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, 2002.
- [35] ROSKOVIC R.; BJEGOVIĆ D., «Role of mineral additions in reducing CO₂ emission», *Cement and Concrete Research*, n°35, pp. 974-978, 2005.
- [36] TELLER P., *Evaluation environnementale de la valorisation énergétique des déchets. Application de la méthodologie LCA*, Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Belgique, 1999.
- [37] TREZZA M.A.; SCIAN A.N., «Waste fuels : their effect on Portland cement clinker», *Cement and Concrete Research*, n°35, pp. 438-444, 2005.
- [38] TREZZA M.A.; SCIAN A.N., «Waste with chrome in the Portland cement clinker production», *Journal of Hazardous Materials*, n°147, pp. 188-196, 2007.
- [39] VAN LOO W., «Dioxin/Furan formation and release in the cement industry», *Environmental Toxicology and Pharmacology*, n°25, pp. 128-130, 2008.
- [40] WESCHE K., *Fly Ash In Concrete. Properties and Performance*, Report 7, London : E. & F. N. Spon, 1991.
- [41] YOUNG S. B. et al., *Substudy 6: What LCA Can Tell Us about the Cement Industry*, March 2002.
-

Sites internet

- [42] <http://eippcb.jrc.es/pages/FActivities.htm> , European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (dernière visite : 13/05/08)
- [43] <http://ex-elca2.bologna.enea.it/cm/navContents?l=EN&navID=zzTest1&subNavID=2&pagID=2> , Eco Smes – LCA Definition (dernière visite 14/05/08)
- [44] <http://www.coprocessing.info/> , Traitement des déchets industriels dans les fours à ciment ou les incinérateurs : une comparaison environnementale (dernière visite : 20/05/08)
- [45] <http://www.goodyear.com> (dernière visite : 14/05/08)
- [46] <http://www.heidelbergcement.com/benelux/fr/cbr/home.htm> (dernière visite : 14/05/08)
- [47] http://www.pre.nl/life_cycle_assessment (dernière visite : 13/05/08)
- [48] <http://www.recyfuel.be> (dernière visite : 14/05/08)
- [49] <http://www.recytyre.be> (dernière visite : 14/05/08)
- [50] http://www.scaek.dz/docs_techniques/chimie%20des%20ciment%203.pdf , Chapitre III, La composition chimique des clinkers (dernière visite : 13/05/08)
- [51] <http://www2.ulg.ac.be/cior-fsa/> , Site du Laboratoire de Chimie Industrielle (dernière visite : 14/05/08)

CHAPITRE X. ANNEXES

Annexe 1. Résumé des normes ISO/FDIS 14040-14043

1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude

L'objectif et le champ de l'étude d'une analyse du cycle de vie doivent être clairement définis et compatibles à l'application prévue (cf. ISO/FDIS 14041).

1.1. Objectif de l'étude

L'objectif d'une étude d'analyse du cycle de vie doit préciser sans ambiguïté l'application prévue, les raisons pour lesquelles l'étude est effectuée et la cible visée, c'est-à-dire à qui sont destinés les résultats (cf. ISO/FDIS 14041).

1.1.1. Applications prévues

1.1.2. Raisons pour effectuer l'étude

1.1.3. Cibles visées

1.2. Champ de l'étude

Il convient que le champ soit suffisamment bien défini pour garantir que l'ampleur, la profondeur et le niveau de détail de l'étude sont compatibles avec l'objectif défini et suffisants pour y répondre.

L'analyse du cycle de vie est une technique itérative. Par conséquent, il peut être nécessaire de modifier le champ de l'étude au cours de l'analyse lorsque des informations supplémentaires sont recueillies (cf. ISO 14040).

1.2.1. Fonction, unité fonctionnelle et flux de référence

Lorsqu'on définit le champ d'une étude d'analyse du cycle de vie, il faut spécifier de manière claire les fonctions (caractéristiques de performance) du produit.

C'est l'unité fonctionnelle qui permet de quantifier les fonctions ainsi identifiées. Elle doit donc être cohérente avec l'objectif et le champ de l'étude.

Une unité fonctionnelle sert principalement de référence à partir de laquelle sont (mathématiquement) normalisées les données d'entrée et de sortie. Il faut donc que l'unité fonctionnelle soit clairement définie et mesurable.

S'agissant d'une unité fonctionnelle donnée, il faut mesurer la quantité de produit nécessaire pour remplir la fonction. Le résultat de la mesure est le flux de référence. C'est sur base des flux de référence que s'effectuent la comparaison entre systèmes pour une même fonction (cf. ISO/FDIS 14041).

1.2.2. Frontières du système

Les frontières du système définissent les processus élémentaires qui seront inclus dans le système à modéliser. [...] Des décisions doivent donc être prises concernant les processus élémentaires à modéliser et le niveau de détail auquel ces processus élémentaires sont étudiés.

Des décisions doivent aussi être prises concernant celles des émissions dans l'environnement qui doivent être évaluées et le niveau de détail de cette évaluation.

Toute décision d'omettre des étapes du cycle de vie, des processus ou des entrants/sortants doit être clairement indiquée et justifiée (cf. ISO/FDIS 14041).

1.2.3. Description des catégories de données

Les données requises pour une analyse du cycle de vie dépendent de l'objectif de l'étude.

Ces données peuvent être collectées à partir des sites de production associés aux processus élémentaires dans les frontières du système, ou obtenues ou calculées à partir de sources publiées. Dans la pratique, toutes les catégories peuvent comprendre à la fois des données mesurées, calculées ou estimées.

Les principaux titres sous lesquels les données peuvent être classées, comprennent :

- *les entrants : énergie, matières premières, auxiliaires, autres entrants physiques ;*
- *les produits ;*
- *les émissions dans l'air, dans l'eau, dans le sol, autres aspects environnementaux.*

Parmi les autres catégories de données [...], on peut citer par exemple le bruit et les vibrations, l'utilisation des sols, les rayonnements, les odeurs et la chaleur perdue.

1.2.4. Critères pour l'inclusion initiale des entrants et des sortants

Le choix de l'ensemble initial des entrants et des sortants pour l'inventaire se fait pendant la définition du champ de l'étude. Identifier les entrants et les sortants [...] qu'il convient d'inclure dans le système de produits en étude, est un processus itératif.

Dans la pratique, plusieurs critères sont retenus dans les analyses de cycle de vie pour décider des entrants à étudier, à savoir la masse, l'énergie et la pertinence environnementale (cf. ISO/FDIS 14041).

1.2.5. Exigences relatives à la qualité des données

Les descriptions de la qualité des données sont importantes pour comprendre la fiabilité des résultats de l'étude et pour en interpréter correctement ce qu'il en ressort.

La règle est de définir la qualité des données par des caractéristiques spécifiques qui décrivent les aspects quantitatifs et qualitatifs (facteur temporel, facteur géographique, facteur technologique, précision, représentativité, reproductibilité,...) ainsi que les méthodes utilisées pour collecter et intégrer ces données (cf. ISO/FDIS 14041).

1.2.6. Comparaison entre systèmes

Pour les études comparatives, l'équivalence des systèmes comparés doit être évaluée avant d'interpréter les résultats. Les systèmes doivent être comparés en utilisant la même unité fonctionnelle, et des considérations méthodologiques équivalentes (frontières du système, qualité des données, évaluation de l'impact,...).

Toutes les différences relatives à ces paramètres entre les systèmes étudiés doivent être identifiées et consignées (cf. ISO 14040).

1.2.7. Considérations relatives aux revues critiques

La revue critique est une technique permettant de vérifier si une analyse du cycle de vie satisfait aux exigences de la présente Norme internationale (cf. ISO 14040) pour ce qui concerne la méthodologie, les données et la présentation du rapport.

2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie (LCI = *Life Cycle Inventory*)

Une analyse de l'inventaire du cycle de vie s'intéresse aux modes de calcul et de recueil des données (cf. ISO/FDIS 14041).

2.1. Modes opératoires de recueil des données

Dans la mesure où le recueil des données peut couvrir plusieurs emplacements de communication et références publiées, [...] il est utile de donner la description des techniques de recueil des données (cf. ISO/FDIS 14041).

2.2. Description qualitative et quantitative des processus élémentaires

Le recueil des données exige une connaissance complète de chaque processus élémentaire. Pour éviter les doubles comptages ou les oublis, la description de chaque processus élémentaire doit être consignée. Ceci implique une description quantitative et qualitative des entrants et des sortants nécessaires pour déterminer le début et la fin du processus, ainsi que la fonction du processus élémentaire (cf. ISO/FDIS 14041).

2.3. Source de documents publiés

Lorsque les données sont recueillies dans des documents publiés, les sources doivent être référencées (cf. ISO/FDIS 14041).

2.4. Procédures de calcul

A l'issue du recueil de données, des procédures de calcul sont nécessaires pour produire les résultats de l'inventaire du système défini pour chaque processus élémentaire et pour l'unité fonctionnelle définie du système de produits à modéliser. Les hypothèses doivent être clairement définies et justifiées (cf. ISO/FDIS 14041).

2.5. Validation des données

Une vérification de la validité des données doit être effectuée pendant le processus de recueil des données. La validation peut impliquer d'établir, par exemple, les bilans de masse, les bilans énergétiques et/ou une analyse comparative des facteurs d'émission.

Le mode de traitement des données manquantes doit être précisé par écrit (cf. ISO/FDIS 14041).

2.6. Analyse de sensibilité pour affinement des frontières du système

Afin de refléter la nature itérative de l'analyse du cycle de vie, les décisions concernant les données à inclure doivent être fondées sur une analyse de sensibilité.

L'analyse de sensibilité peut entraîner l'exclusion (l'inclusion) d'étapes du cycle de vie, mais également d'entrants et de sortants si ceux-ci sont sans importance (significatifs) pour les résultats de l'étude (cf. ISO/FDIS 14041).

2.7. Principes et règles d'imputation

En fait, pour la plupart, les procédés industriels donnent plusieurs produits. [...] Ainsi, les flux de matières ou d'énergie ainsi que les dégagements qui leur sont associés dans l'environnement doivent être imputés aux différents produits conformément aux modes opératoires clairement spécifiés (cf. ISO/FDIS 14041).

3. Evaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA = Life Cycle Impact Assessment)

L'évaluation de l'impact du cycle de vie a pour objectif d'examiner le système de produits dans une perspective environnementale, en utilisant des indicateurs de catégories établis à partir des résultats de l'inventaire du cycle de vie. La phase de l'évaluation de l'impact du cycle de vie fournit également des informations utilisables dans la phase d'interprétation (cf. ISO/DIS 14042).

3.1. Choix des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et des modèles

Pour la plupart des études d'analyse de cycle de vie, des catégories d'impact, des indicateurs ou des modèles déjà existants seront choisis (cf. ISO/DIS 14042).

3.2. Classification

La classification correspond à l'affectation des résultats de l'inventaire du cycle de vie.

Lorsque les résultats de l'inventaire du cycle de vie sont affectés à des catégories d'impact, les points environnementaux associés à ces résultats peuvent être mis en évidence.

3.3. Caractérisation

La caractérisation correspond au calcul des résultats des indicateurs de catégories. Le calcul implique la conversion des résultats de l'inventaire du cycle de vie en unités communes et l'agrégation au sein de la catégorie d'impact des résultats convertis.

La méthode de calcul des résultats des indicateurs doit être identifiée et documentée, y compris les choix de valeur et les hypothèses utilisées.

Pour la plupart des études d'analyse de cycle de vie, des modèles déjà existants seront sélectionnés (cf. ISO/DIS 14042).

3.4. Normalisation

La normalisation correspond au calcul de l'importance des résultats de l'indicateur de catégorie par rapport à une valeur de référence. Cette opération consiste à transformer un résultat d'indicateur en le divisant par une valeur de référence choisie.

Il convient que le choix d'un système de référence tienne compte de la cohérence de l'échelle spatiale et temporelle de ses mécanismes environnementaux et de sa valeur de référence (cf. ISO/DIS 14042).

3.5. Pondération

La pondération est le processus de conversion des résultats de l'indicateur en utilisant des facteurs numériques basés sur des choix de valeur. Elle peut inclure l'agrégation de résultats d'indicateur pondérés.

La démarche de pondération est fondée sur des choix de valeurs et non sur la science classique.

L'application et l'utilisation de méthodes de pondération doivent être cohérentes avec l'objectif et le champ de l'étude de l'analyse de cycle de vie et doivent être totalement transparentes.

Au cours d'une étude d'analyse de cycle de vie, il peut être souhaitable d'utiliser plusieurs méthodes de pondération différentes et de mener une analyse de sensibilité afin d'évaluer les conséquences sur les résultats de l'évaluation de l'impact du cycle de vie des différents choix de valeurs et méthodes de pondération (cf. ISO/DIS 14042).

4. Interprétation des résultats

L'interprétation du cycle de vie a pour objectif d'analyser les résultats, d'établir des conclusions, d'expliquer les limites et de fournir des recommandations, en se basant sur les résultats des phases précédentes de l'analyse de cycle de vie (cf. ISO/DIS 14043).

4.1. Identification des résultats les plus significatifs

La détermination des points significatifs d'un système de produits peut être simple ou complexe. La présente norme ne fournit pas de lignes directrices quant à savoir pourquoi un point peut être ou ne pas être pertinent dans une étude, ou pourquoi un point peut être ou ne pas être significatif pour un système de produits (cf. ISO/DIS 14043).

4.2. Analyse d'incertitude

L'objectif de l'analyse d'incertitude est d'évaluer la fiabilité des résultats, en évaluant si l'incertitude sur les points significatifs a un effet sur la conclusion (cf. ISO/DIS 14043).

4.3. Conclusions et recommandations

Après avoir identifié les résultats les plus significatifs et réalisé une analyse d'incertitude, des conclusions sont établies.

Les recommandations doivent se fonder sur les conclusions finales de l'étude et refléter une conséquence logique et raisonnable des conclusions (cf. ISO/FDIS 14043).

5. Complément d'information

6. Bibliographie

Annexe 2. Calcul de l'unité fonctionnelle

Selon les données de CBR et du BREF de 2001, l'énergie requise pour une tonne de clinker est de 3,486 gigajoules. Le tableau ci-dessous présente les calculs permettant d'arriver à la quantité de déchets à valoriser.

Déchets	Pourcentage énergétique	Quantité d'énergie pour 1 t de clinker en MJ	Quantité d'énergie pour 0,79 t de clinker en MJ	PCI (MJ/kg)	Masse (kg)
Pneus	8,916%	3,108E+02	2,455E+02	3,331E+01	7,372E+00
Farines animales	15,558%	5,424E+02	4,285E+02	1,900E+01	2,255E+01
Sciures imprégnées	28,826%	1,005E+03	7,939E+02	1,150E+01	6,903E+01
Total(%)	53,300%			Total	9,895E+01

Tableau X.1 Calculs de la quantité de déchets pour 790 kg de clinker

Lors de l'utilisation d'un incinérateur, les 98,95 kg de déchets répartis entre les différents combustibles selon les pourcentages donnés dans le Tableau X.1 vont produire de l'électricité. La quantité produite est calculée par le Tableau X.2. Nous utiliserons un rendement de 22% pour la transformation du contenu énergétique des déchets en électricité, rendement actuellement atteint par la plupart des incinérateurs. La consommation de l'incinérateur est proportionnelle à la quantité de déchets à brûler et est de 0,511 GJ_e/t déchets. Cette donnée provient du BREF Incinération de 2006 et est la valeur moyenne.

Déchets	Masse	PCI (MJ/kg)	Energie contenue dans les déchets (MJ)	Electricité totale produite (kWh)
Pneus	7,372E+00	3,331E+01	2,455E+02	1,501E+01
Farines animales	2,255E+01	1,900E+01	4,285E+02	2,618E+01
Sciures imprégnées	6,903E+01	1,150E+01	7,939E+02	4,851E+01
Total brut (kWh)				8,970E+01
Consommation de l'incinérateur (kWh)				1,405E+01
Electricité nette (kWh)				7,565E+01

Tableau X.2 Calcul de l'électricité produite par les déchets

Annexe 3. Calcul des valeurs du système SimaPro7.1

Le système SimaPro7.1 utilise les déchets comme combustibles de substitution pour une valeur de 1,22 MJ. Nous supposons que les déchets utilisés dans ce système seront de même nature et en même proportion que ceux renseignés par CBR Lixhe. Les calculs présentés dans le Tableau X.3 permettent d'obtenir l'électricité produite si ces déchets avaient été incinérés et donc la quantité d'électricité à produire par mixte belge avec nucléaire.

Déchets	Masse (kg) pour 53,3 % de substitution	Pourcentage de substitution	Masse (kg) pour 34,997% de substitution	PCI (MJ/kg)	Energie contenue dans les déchets (MJ)	Electricité totale produite (kWh)	
Pneus	7,372E+00	34,997%	4,841E+00	3,331E+01	1,612E+02	9,853E+00	
Farines animales	2,255E+01		1,481E+01	1,900E+01	2,813E+02	1,719E+01	
Sciures imprégnées	6,903E+01		4,533E+01	1,150E+01	5,212E+02	3,185E+01	
		Total (kg)	6,497E+01		Total brut (kWh)	5,890E+01	
						Consommation de l'incinérateur	9,223E+00
						Electricité nette (kWh)	4,968E+01

Tableau X.3 Calculs de la quantité d'électricité à produire par le mixte belge avec nucléaire

A partir de la valeur de l'électricité nette obtenue pour les déchets valorisés en cimenterie, la quantité d'électricité produite par incinération des déchets restant sera de 75,65 – 49,68 kWh ce qui nous donne une valeur de 25,97 kWh.

Le même schéma aboutissant à la quantité d'électricité nette présenté au Tableau X.3 aurait également pu être appliqué ici, et nous aurions évidemment obtenu le même résultat.

Annexe 4. Données et hypothèses utilisées pour le système CBR Lixhe

Composé(s)	Valeur minimale (mg/Nm ³ sec)	Valeur maximale (mg/Nm ³ sec)	Valeur moyenne (mg/Nm ³ sec)
Σ(Cd, Tl)	8,00E-03	4,20E-02	2,00E-02
Σ(Sb, As, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Mn, V, Sn)	1,53E-01	3,89E-01	2,15E-01
HCl	8,00E-01	1,30E+00	1,00E+00
HF	2,50E-01	8,00E-01	5,00E-01
Hg	1,00E-02	3,20E-02	1,80E-02
NO _x	5,18E+02	8,00E+02	6,54E+02
PCDD/F	4,00E-06	2,30E-05	1,11E-05
Poussières	1,00E-01	1,08E+01	3,00E+00
SO ₂	1,00E+01	1,30E+01	1,10E+01
Zn	8,90E-02	4,97E-02	2,17E-01

Tableau X.4 Données de CBR Lixhe pour les émissions dans l'air

Composé	Valeur utilisée (kg/kg clinker)
As	4,30E-08
Cd	3,25E-08
Co	4,30E-08
Cr	4,17E-08
Cr(VI)	1,29E-09
Cu	4,30E-08
HCl	2,00E-06
HF	1,00E-06
Hg	3,60E-08
Mn	4,30E-08
Ni	4,30E-08
NO _x	1,31E-03
Pb	4,30E-08
PCDD/F	2,22E-11
Poussières <2,5µm	2,40E-06
2,5 µm<Poussières<10 µm	3,60E-06
Sb	4,30E-08
Sn	4,30E-08
SO ₂	2,20E-05
Tl	7,48E-09
V	4,30E-08
Zn	4,34E-07

Tableau X.5 Données utilisées pour le système CBR Lixhe après hypothèses

Les hypothèses sont les suivantes :

- Pour passer des mg/Nm³sec à des kg/kg de clinker, nous avons supposé qu'une tonne de clinker produit 2000 m³ de fumées et donc qu'un kg produit 2 m³. Nous n'avons plus qu'à multiplier par 2×10^{-6} .
- Pour la somme Σ (Cd, Tl), nous avons partagé ce rapport selon la quantité de chacun des éléments dans les réactifs utilisés. Nous obtenons 81,3 % de Cadmium et 19,7 % de Thallium. Le calcul se trouve à l'Annexe 10.
- Pour la somme Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Ni, Cu, Mn, V, Sn), nous avons pris la valeur moyenne calculée au tableau 6 et nous l'avons divisée par 10 en supposant que chaque composant contribuait de la même manière à l'émission.
- Pour le chrome (III) et le chrome (VI), nous avons utilisé le rapport obtenu par la base de données SimaPro7.1. Le chrome (III) contribue pour 97 % de la valeur globale et le chrome (VI) pour 3 %. La valeur globale est bien entendu celle calculée par le point précédent.
- Pour les poussières, nous avons également utilisé le rapport obtenu par SimaPro7.1 et nous obtenons alors une répartition de la valeur globale avec 40 % pour les poussières inférieures à 2,5 μm , et 60 % pour les poussières comprises entre 2,5 et 10 μm .

Lors de l'analyse de sensibilité, nous utiliserons respectivement les données valeurs minimales et valeurs maximales pour les systèmes CBR Bas et CBR Haut. Les hypothèses utilisées seront les mêmes que pour le système CBR Lixhe Moyen.

Annexe 5. Données et hypothèses utilisées pour le système BREF Charbon.

Composé(s)	Borne inférieure (kg/t clinker)	Borne supérieure (kg/t clinker)	Valeur moyenne (kg/t clinker)
Σ (Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, Sn, V, Zn)	1,00E-08	6,00E-07	3,05E-07
Σ (As, Co, Ni, Se, Te)	2,00E-09	2,00E-07	1,01E-07
Σ (Hg, Cd, Tl) mainly Hg	2,00E-08	6,00E-07	3,10E-07
HCl	2,00E-03	5,00E-02	2,60E-02
HF	8,00E-04	1,00E-02	5,40E-03
NO _x	4,00E-01	6,00E+00	3,20E+00
PCDD/F	2,00E-10	1,00E-09	6,00E-10
Poussières	1,00E-02	4,00E-01	2,05E-01
SO ₂	2,00E-02	7,00E+00	3,51E+00

Tableau X.6 Données du BREF 2001 pour les émissions dans l'air

Composé	Valeur utilisée (kg/kg clinker)
As	2,02E-08
Co	2,02E-08
Cr	3,70E-08
Cr(VI)	1,14E-09
Cu	3,81E-08
HCl	2,60E-05
HF	5,40E-06
Hg	3,10E-07
Mn	3,81E-08
Ni	2,02E-08
NO _x	3,20E-03
Pb	3,81E-08
PCDD/F	6,00E-10
Poussières <2,5 μ m	8,20E-05
2,5 μ m < Poussières < 10 μ m	1,23E-04
Sb	3,81E-08
Se	2,02E-08
Sn	3,81E-08
SO ₂	3,51E-03
V	3,81E-08
Zn	3,81E-08

Tableau X.7 Données utilisées pour le système BREF Charbon après hypothèses.

Les hypothèses sont les suivantes :

- Pour la somme Σ (Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, Sn, V, Zn), nous avons pris la valeur moyenne calculée au tableau 4 et nous l'avons divisée par 8 en supposant que chaque composant contribuait de la même manière à l'émission.
- Pour le chrome (III) et le chrome (VI), nous avons utilisé le rapport obtenu par la base de données SimaPro7.1 relative au clinker. Le chrome (III) contribue pour 97 % de la valeur globale et le chrome (VI) pour 3 %. La valeur globale est bien entendu celle calculée par le point précédent.
- Pour la somme Σ (As, Co, Ni, Se, Te), nous avons également pris la valeur moyenne du tableau 4 et l'avons divisé par 5 pour que chaque polluant contribue de manière égale à l'émission.
- Pour la somme Σ (Hg, Cd, Tl) mainly Hg, nous avons considéré que nous n'avons que du mercure.
- Pour les poussières, nous avons également utilisé le rapport obtenu par SimaPro7.1 et nous obtenons alors une répartition de la valeur globale avec 40 % pour les poussières inférieures à 2,5 μm , et 60 % pour les poussières comprises entre 2,5 et 10 μm .

Lors de l'analyse de sensibilité, nous utiliserons les données du Tableau X.6 pour les systèmes BREF charbon bas et BREF charbon haut avec respectivement les données bornes inférieures et bornes supérieures. Les hypothèses utilisées seront les mêmes que pour le système BREF charbon moyen.

Nous utiliserons également les données du Draft qui se trouvent au Tableau X.9 pour la seconde partie de l'analyse de sensibilité. Le Tableau X.8 montre les différentes bornes des fourchettes se trouvant dans le document.

Composé(s)	Valeur minimale (mg/Nm ³ sec)	Valeur maximale (mg/Nm ³ sec)	Valeur moyenne (mg/Nm ³ sec)
Σ (Cd, Tl)	0,00E+00	6,80E-01	3,40E-01
Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	0,00E+00	4,00E+00	2,00E+00
HCl	2,00E-02	2,00E+01	1,00E+01
HF	9,00E-03	3,20E+01	1,60E+01
Hg	0,00E+00	5,70E-01	2,85E-01
NO _x	1,45E+02	2,04E+03	1,09E+03
PCDD/F	1,20E-08	2,70E-04	1,35E-04
Poussières	2,70E-01	2,27E+02	1,14E+02
SO ₂	0,00E+00	4,84E+03	2,42E+03

Tableau X.8 Données du Draft 2007

Composé	Valeur moyenne (kg/kg clinker)
As	4,44E-07
Cd	5,44E-07
Cr	4,31E-07
Cr(VI)	1,33E-08
Cu	4,44E-07
PCDD/F	2,70E-10
Sb	4,44E-07
Co	4,44E-07
Pb	4,44E-07
Mn	4,44E-07
Hg	5,70E-07
Ni	4,44E-07
NO _x	2,19E-03
Poussières <2,5µm	9,09E-05
2,5 µm<Poussières<10 µm	1,36E-04
HCl	2,00E-05
HF	3,20E-05
SO ₂	4,84E-03
Tl	1,36E-07
V	4,44E-07

Tableau X.9 Données utilisées pour le système se basant sur le Draft de 2007 après hypothèses

Les hypothèses sont les suivantes :

- Pour passer des mg/Nm³sec à des kg/kg de clinker, nous avons supposé qu'une tonne de clinker produit 2000 m³ de fumées et donc qu'un kg produit 2 m³. Nous n'avons plus qu'à multiplier par 2×10⁻⁶.
- Pour la somme Σ (Cd, Tl), nous avons partagé ce rapport selon la quantité de chacun des éléments dans les réactifs utilisés. Nous obtenons 81,3% de Cadmium et 19,7 % de Thallium.
- Pour la somme Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V), nous avons pris la valeur moyenne calculée au tableau 6 et nous l'avons divisée par 9 en supposant que chaque composant contribuait de la même manière à l'émission.
- Pour le chrome et le chrome (VI), nous avons utilisé le rapport obtenu par la base de données SimaPro7.1. Le chrome (III) contribue pour 97 % de la valeur globale et le chrome VI pour 3 %. La valeur globale est bien entendu celle calculée par le point précédent.
- Pour les poussières, nous avons également utilisé le rapport obtenu par SimaPro7.1 et nous obtenons alors une répartition de la valeur globale avec 40 % pour les poussières inférieures à 2,5 µm, et 60 % pour les poussières comprises entre 2,5 et 10 µm.

Annexe 6. Données utilisées pour la modélisation de l'incinération

Les émissions lors de la combustion des déchets vont dépendre de leur nature. Nous distinguerons alors les déchets solides municipaux et les déchets dangereux.

Les Tableau X.10 et Tableau X.11 contiennent les données du BREF Incinération ainsi que les données utilisées après hypothèses pour les déchets solides municipaux.

Composés	Valeur minimale (mg/m ³)	Valeur maximale (mg/m ³)	Valeur moyenne (mg/m ³)
∑ (Cd, Tl)	3,00E-04	2,00E-03	1,15E-03
As	<0,0001	1,00E-03	1,00E-03
Cd	3,00E-04	3,00E-03	1,65E-03
Co	<0,002		2,00E-03
Cr	4,00E-04	2,00E-03	1,20E-03
HCl	1,00E-01	1,00E+01	5,05E+00
HF	1,00E-01	1,00E+00	5,50E-01
Hg	5,00E-04	5,00E-02	2,53E-02
NH ₃	1,00E-01	3,00E+00	1,55E+00
Ni	3,00E-04	2,00E-03	1,15E-03
NO _x	3,00E+01	2,00E+02	1,15E+02
Pb	<0,002	4,40E-02	4,40E-02
PCDD/F	2,00E-07	8,00E-05	4,01E-05
Poussières	1,00E-01	1,00E+01	5,05E+00
SO ₂	5,00E-01	5,00E+01	2,53E+01

Tableau X.10 Données du BREF 2006 pour les déchets municipaux

Composé	Valeur moyenne (kg/m ³)
As	5,50E-10
Cd	1,65E-09
Co	2,00E-09
Cr	1,17E-09
Cr(VI)	2,87E-11
HCl	5,05E-06
HF	5,50E-07
Hg	2,53E-08
NH ₃	1,55E-06
Ni	1,15E-09
NO _x	1,15E-04
Pb	2,30E-08
PCDD/F	4,01E-11
Poussières <2,5µm	3,71E-06
2,5 µm<Poussières<10 µm	9,86E-07
SO ₂	2,53E-05

Tableau X.11 Données utilisées pour l'incinération des déchets municipaux après hypothèses

Les Tableau X.12 et Tableau X.13 contiennent les données du BREF Incinération ainsi que les données utilisées après hypothèses pour les déchets dangereux.

Composés	Valeur minimale (mg/m ³)	Valeur maximale (mg/m ³)	Valeur moyenne (mg/m ³)
Σ (Cd, Tl)	5,00E-04	5,00E-02	2,53E-02
Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V)	1,30E-03	5,00E-01	2,51E-01
HCl	1,00E-01	1,00E+01	5,05E+00
HF	4,00E-02	1,00E+00	5,20E-01
Hg	3,00E-04	3,00E-02	1,52E-02
NO _x	4,00E+01	2,00E+02	1,20E+02
PCDD/F	2,00E-06	1,00E-04	5,10E-05
Poussières	1,00E-01	1,00E+01	5,05E+00
SO ₂	1,00E-01	5,00E+01	2,51E+01

Tableau X.12 Données du BREF 2006 pour les déchets dangereux

Composé	Valeur moyenne (kg/m ³)
As	2,79E-08
Cd	2,05E-08
Co	2,79E-08
Cr	2,72E-08
Cr(VI)	6,67E-10
Cu	2,79E-08
HCl	5,05E-06
HF	5,20E-07
Hg	1,52E-08
Mn	2,79E-08
Ni	2,79E-08
NO _x	1,20E-04
Pb	2,79E-08
PCDD/F	5,10E-11
Poussières <2,5µm	3,71E-06
2,5 µm<Poussières<10 µm	9,86E-07
Sb	2,79E-08
SO ₂	2,51E-05
Tl	4,72E-09
V	2,79E-08

Tableau X.13 Données utilisées pour l'incinération des déchets dangereux après hypothèses.

Les hypothèses pour les deux types de déchets sont identiques et les suivantes :

- Pour la somme Σ (Cd, Tl), nous avons partagé ce rapport selon la quantité de chacun des éléments dans les réactifs utilisés. Nous obtenons 81,3 % de Cadmium et 19,7 % de Thallium.
- Pour la somme Σ (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V), nous avons pris la valeur moyenne calculée au tableau 6 et nous l'avons divisée par 9 en supposant que chaque composant contribuait de la même manière à l'émission.
- Pour le chrome et le chrome VI, nous avons utilisé le rapport obtenu par la base de données SimaPro7.1 incinération de solvants. Le chrome (III) contribue pour 97,544% de la valeur globale et le chrome VI pour 2,456%. La valeur globale est bien entendu celle calculée par le point précédent.
- Pour les poussières, nous avons également utilisé le rapport obtenu par SimaPro7.1 pour la base de données incinération de solvants et nous obtenons alors une répartition de la valeur globale avec 73,4 % pour les poussières inférieures à 2,5 µm, et 26,6 % pour les poussières comprises entre 2,5 et 10 µm.

Pour modéliser notre incinérateur, nous aurons également besoin de la quantité de m³ de fumées produites par nos déchets. Pour ce faire, nous nous baserons également sur les données du BREF Incinération d'août 2006.

Une tonne de déchets produira entre 4500 et 6000 m³ de fumées, nous utiliserons la valeur moyenne de 5250 m³ par tonnes de déchets. Il est évident que cette valeur est arbitraire, et

n'est certainement pas celle obtenue en réalité. Nous nous en contenterons dans cette étude, le but de ce travail n'étant pas de modéliser un incinérateur en détail.

Pour le système BREF Charbon, les déchets à incinérer et les fumées engendrées se trouvent dans les Tableau X.14 et Tableau X.15.

Déchets	Masse (kg)	Fumées (m ³)
Pneus	7,37	38,70
Farines animales	22,55	118,39
Sciures imprégnées	69,03	362,41
Total	98,95	519,50

Tableau X.14 Fumées engendrées par les déchets incinérés dans le système BREF charbon

Déchets	Fumées (m ³)
Municipaux	157,09
Dangereux	362,41

Tableau X.15 Fumées engendrées par les déchets incinérés dans le système BREF charbon

Pour le système SimaPro7.1, les déchets à incinérer et les fumées engendrées se trouvent dans les Tableau X.16 et Tableau X.17.

Déchets	Masse (kg)	Fumées (m ³)
Pneus	2,53	13,29
Farines animales	7,74	40,65
Sciures imprégnées	23,70	124,45
Total	33,98	178,39

Tableau X.16 Fumées engendrées par les déchets incinérés dans le système SimaPro7.1

Déchets	Fumées (m ³)
Municipaux	53,94
Dangereux	124,45

Tableau X.17 Fumées engendrées par les déchets incinérés dans le système SimaPro7.1

Annexe 7. Composition des combustibles de substitution

Les farines animales

Afin de vérifier la composition des déchets qui leur sont amenés, l'usine CBR Lixhe effectue des analyses. Le PCI des farines animales est de 19 MJ/kg. Afin de retrouver une composition approximative concordante avec le PCI et les données trouvées dans la littérature, nous allons nous baser sur la formule suivante :

$$PCI_{(MJ\ kg)} = 33,620 \times C + 120,900 \times H - \frac{O}{8} + 9,280 \times S - 2,443 \times H_2O + \frac{9}{8} O$$

Équation 5. Calcul du PCI [21]

Les constituants dans cette formule sont exprimés en fraction massique.

Le Tableau X.18 reprend le pourcentage de chaque constituant pouvant apporter les éléments repris dans la formule ci-dessous. Pour la matière volatile, nous avons considéré en première approximation une composition semblable à l'éthanol (C₂H₅OH).

Composé	Pourcentage massique dans la matière brute	Pourcentage massique d'oxygène dans la matière brute
SiO ₂	0,40	0,21
Al ₂ O ₃	0,08	0,04
Fe ₂ O ₃	0,07	0,02
CaO	6,70	1,91
Na ₂ O	0,58	0,15
K ₂ O	0,74	0,13
MgO	0,17	0,07
P ₂ O ₅	9,60	5,41
Total (%)		7,94

Tableau X.18 Pourcentages massiques d'oxygène dans la matière brute

Composé	Pourcentage massique sur la matière sèche
Matière volatile	72,97
C	45,29
H	7,55
O	20,13

Tableau X.19 Pourcentages massiques de la matière volatile en supposant de l'éthanol

Composé	Pourcentage massique	Faction massique	Vérification PCI (MJ/kg)
C	45,29	0,45	15,23
H	7,55	0,08	9,13
O	28,07	0,28	-5,01
S	0,60	0,01	0,06
H ₂ O	7,00	0,07	-0,17
Total (MJ/kg)			19,22

Tableau X.20 Composition approximative des farines animales et vérification du PCI

Nous voyons qu'avec cette composition, nous arrivons approximativement au PCI fourni par CBR Lixhe. Nous nous baserons donc sur cette composition pour les calculs ultérieurs, tout en sachant que les valeurs peuvent varier un peu.

Le pourcentage de l'eau a été trouvé dans la référence [19].

Les pneus

Lors des recherches concernant le PCI des pneus dans la littérature, la valeur trouvée était de 24 MJ/kg. Nous avons tout de même décidé de refaire le calcul sur base de la composition élémentaire ainsi que de l'Équation 5. Nous avons alors obtenu une valeur plus élevée.

Composants	% massique	% C	% H	% O	% N	% S	% Fe
C ₅ H ₈	51	45	6				
Noir de Carbone	28	28					
Acier	10						10
Nylon (C ₆ H ₁₁ ON)	4	2,55	0,39	0,57	0,5		
Soufre	3					3	
TOTAL	96	75,6	6,38	0,57	0,5	3	10

Tableau X.21 Composition massique d'un pneu [24]

Composé	Pourcentage massique	Faction massique	Vérification PCI (MJ/kg)
C	75,60	0,76	25,42
H	6,38	0,06	7,71
O	0,57	0,01	-0,10
S	3	0,03	0,28
H ₂ O	0	0,00	0,00
Total (MJ/kg)			33,31

Tableau X.22 Composition approximative des pneus et vérification du PCI

Nous pouvons remarquer qu'à partir de la composition et de la formule utilisée, nous obtenons un PCI de 33,31 MJ/kg ce qui est plus élevé que ce qui nous était fourni. Nous utiliserons dans ce travail le PCI trouvé par la formule précitée. En effet, en ce qui concerne le PCI trouvé dans la littérature, nous ne possédons pas de données précises pour la composition. Nous avons donc préféré utiliser une composition donnée et recalculer à partir de cela le PCI.

Les sciures imprégnées

Nous nous baserons également sur l'Équation 5 afin de calculer une composition approximative des sciures imprégnées. Vu le faible PCI des sciures imprégnées, 11,5 MJ/kg, nous utiliserons ici comme solvant de base le méthanol (CH_3OH) présent dans les matières volatiles. Ce choix est porté arbitrairement afin de pouvoir vérifier le pouvoir calorifique.

Composé	Pourcentage massique dans la matière brute	Pourcentage massique d'oxygène dans la matière brute
SiO_2	7,33	3,91
Al_2O_3	1,85	0,87
Fe_2O_3	1,94	0,58
CaO	3,09	0,88
Na_2O	0,53	0,14
K_2O	0,44	0,07
MgO	0,51	0,20
P_2O_5	0,73	0,41
Total (%)		7,07

Tableau X.23 Pourcentages massiques d'oxygène dans la matière brute

Composé	Pourcentage massique sur la matière sèche
Matière volatile	65,11
C	24,42
H	8,14
O	32,56

Tableau X.24 Pourcentages massiques de la matière volatile en supposant du méthanol

Composé	Pourcentage massique	Faction massique	Vérification PCI (MJ/kg)
C	24,42	0,24	8,21
H	8,14	0,08	9,84
O	39,63	0,40	-7,08
S	3,54	0,04	0,33
H_2O	10	0,10	-0,24
Total (MJ/kg)			11,06

Tableau X.25 Composition approximative des sciures imprégnées et vérification du PCI

Nous avons approximé un pourcentage massique de l'eau d'environ 10%. Il se peut qu'il soit un peu plus élevé, mais nous voyons que ce pourcentage ne va pas jouer un grand rôle dans le PCI. Un pourcentage de 20% nous donnerait un PCI de 10,81 MJ/kg, ce qui est plus bas que celui renseigné par CBR Lixhe.

Il est certain que les valeurs trouvées ici peuvent varier légèrement en pratique. Dans la suite de ce travail, nous utiliserons la composition du Tableau X.25 en ce qui concerne les sciures imprégnées.

Annexe 8. Calcul du dioxyde de carbone pour les systèmes CBR et BREF Charbon

Afin de compléter les émissions dans l'air fournies par la société CBR ou par le BREF, nous allons effectuer un bilan en CO₂ pour chacun des deux systèmes.

Matière première	Masse (kg)	Masse CaCO ₃ (kg)	n CaCO ₃ (mole)	mCO ₂ (kg)
Limon	41,20	30,90	0,31	13,59
Craie	1004,92	1004,92	10,04	441,87
Tuffeau	334,97	251,23	2,51	110,47
Total (kg)				565,92

Tableau X.26 Calcul du CO₂ émis par la décarbonatation de CaCO₃ pour une tonne de clinker

Combustible	Masse (kg)	Masse C (kg)	n C (mole)	mCO ₂ (kg)
Charbon	61,14	42,80	3,56	156,81
Gaz	0,85	0,80	0,07	2,93
Pneus	9,33	7,05	0,59	25,85
Farines animales	28,54	12,93	1,08	47,37
Sciures imprégnées	87,38	21,34	1,78	78,17
Total (kg)				311,14

Tableau X.27 Calcul du CO₂ émis lors de la combustion pour une tonne de clinker pour le système CBR Lixhe

Bilan CO ₂	kg/t clinker	kg/kg clinker
Global avec déchets	877,060	0,877
Fossile avec déchets	829,690	0,830

Tableau X.28 Données utilisées pour le système CBR Lixhe

Le Tableau X.28 présente les valeurs utilisées pour le CO₂, nous utiliserons comme expliqué la valeur se rapportant au CO₂ fossile qui est en fait la valeur reprise dans la ligne « Global avec déchets » moins le CO₂ émis par les farines animales, supposé biologique.

Pour le système BREF charbon, les données concernant les matières premières ne changent pas, seul l'apport des combustibles fossiles va être différent vu l'enlèvement des déchets et leur remplacement par du charbon noir. Le Tableau X.29 présente les nouvelles valeurs concernant les combustibles fossiles, et le Tableau X.30 la valeur utilisée pour le système BREF charbon.

Combustible	Masse (kg)	Masse C (kg)	n C (mole)	Masse CO ₂ (kg)
Charbon	132,60	92,82	7,73	340,10
Gaz	0,85	0,80	0,07	2,93
Total (kg)				343,04

Tableau X.29 Calcul du CO₂ émis lors de la combustion pour le système BREF charbon

Bilan CO2	kg/t clinker	kg/kg clinker
Global	908,959	0,909

Tableau X.30 Données utilisées pour le système BREF charbon

La quantité de CO₂ dégagée par l'incinération des déchets sera donnée par le Tableau X.31.

Combustible	Masse (kg)	Masse C (kg)	n C (mole)	mCO2 (kg)
Pneus	9,33	7,05	0,59	25,85
Farines animales	28,54	12,93	1,08	47,37
Sciures imprégnées	87,38	21,34	1,78	78,17
Total (kg)				151,39

Tableau X.31 Calcul du CO₂ émis lors de la combustion des déchets en incinération

Seul le CO₂ fossile sera pris en compte, et la valeur utilisée sera donc celle se trouvant dans le Tableau X.32.

Bilan CO ₂	kg/t clinker	kg/kg clinker
Fossile	104,02	0,10402

Tableau X.32 Valeur du CO₂ fossile pour l'incinération

Pour l'incinération, en fonction de la nature des déchets, nous savons que nous aurons deux catégories : les déchets municipaux et les déchets dangereux. En transformant la valeur citée au Tableau X.32, nous obtiendrons les émissions de CO₂ par catégorie et par Nm³.

Bilan CO2	kg/Nm ³
Déchets municipaux	0,13
Déchets dangereux	0,17

Tableau X.33 Données utilisées pour l'incinération des déchets

Annexe 9. Calcul du transport des réactifs

Les distances se trouvant dans les Tableau X.34 et Tableau X.35 ont été calculées à partir du site internet Mappy.be, logiciel permettant de calculer les distances entre deux lieux par la route. Nous avons arrondi ces valeurs, le but étant d'avoir une idée du transport et de son impact, et pas une distance au mètre près. C'est pour cette raison que nous avons supposé la distance égale qu'elle soit parcourue en bateau ou en camion.

Matières premières et combustibles de substitution	Provenance	Distance jusque Lixhe (km)	Pourcentage massique supposé	Transport	Poids	tkm routier	tkm bateau
Cendres volantes	Awirs	35	75%	Bateau	31,38		1,10
	Bruxelles	113	25%	Route	10,46	1,18	
Produits ferreux	Herstal	16	100%	Bateau	20,15		0,32
Pneus	Roermond (P-B)	64	100%	Bateau	7,37		0,47
Farines animales	Denderleeuw	140	25%	Route	5,64	0,79	
	Valette du Var (F)	1083	37,5%		8,46	9,16	
	Saint Juire (F)	810	37,5%		8,46	6,85	
Sciures imprégnées	Engis	40	75%	Bateau	51,77		2,07
	Seneffe	130	12,5%	Route	8,63	1,12	
	Ziepel	550	12,5%		8,63	4,75	
Total (tkm)						23,85	3,96

Tableau X.34 Calcul du transport à partir des distances communiquées par CBR Lixhe pour les matières premières et combustibles de substitution

Lorsque plusieurs lieux d'origine nous étaient proposés, nous avons émis des hypothèses quant au pourcentage du total provenant de chaque lieu. En général, nous avons privilégié les lieux à plus proches distances de Lixhe excepté pour les farines animales qui proviennent généralement de France. Nous avons supposé que les matières étaient acheminées par le réseau routier lorsque cela n'avait pas été précisé.

Ces hypothèses ont été choisies arbitrairement, mais nous voyons que nous n'aurons finalement pas une grande quantité de tkm que ce soit par transport routier ou fluvial.

Additifs	Provenance	Distance jusque Lixhe (km)	Pourcentage massique supposé	Transport	Poids	tkm routier	tkm bateau
Cendres volantes	Awirs	35	75%	Bateau	20,25		0,71
	Bruxelles	113	25%	Route	6,75	0,76	
Laitier	Ougrée	36	100%	Route	163	5,87	
Total (tkm)						6,63	0,71

Tableau X.35 Calcul du transport à partir des données communiquées par CBR Lixhe pour les additifs

Annexe 10. Calcul des facteurs d'émissions pour certains polluants du système CBR Lixhe

Hg	% massique	masse	Quantité (kg)
Farines animales	3,00E-06	2,85E+01	8,56E-05
Sciures imprégnées	7,90E-07	8,74E+01	6,90E-05

Quantité contenue dans les déchets (kg)	1,55E-04
Emission CBR (kg/ t clinker)	3,60E-05
Facteur d'émission	23,28%

Tableau X.36 Facteur d'émission du Mercure

Zn	% massique	masse	Quantité (kg)
Farines animales	5,23E-05	2,85E+01	1,49E-03
Sciures imprégnées	2,05E-03	8,74E+01	1,79E-01

Quantité contenue dans les déchets (kg)	1,80E-01
Emission CBR (kg/ t clinker)	4,34E-04
Facteur d'émission	0,24%

Tableau X.37 Facteur d'émission du Zinc

Cd	% massique	masse	Quantité (kg)	Tl	% massique	masse	Quantité (kg)
Farines animales	1,94E-05	2,85E+01	5,52E-04	Farines animales	1,41E-06	2,85E+01	4,02E-05
Sciures imprégnées	2,92E-06	8,74E+01	2,55E-04	Sciures imprégnées	1,67E-06	8,74E+01	1,46E-04

Quantité de Cd contenue dans les déchets (kg)	8,07E-04
---	----------

Quantité de Tl contenue dans les déchets (kg)	1,86E-04
---	----------

Tableau X.38 Quantités de Cd et de Tl contenues dans les déchets

% Cd	81,26%
% Tl	18,74%

Tableau X.39 Pourcentages massiques de Cd et de Tl dans les déchets

Emission CBR (kg/t clinker)	4,00E-05
Facteur d'émission Cd	0,003251%
Facteur d'émission Tl	0,000749%

Tableau X.40 Facteurs d'émission du Cadmium et du Thallium

Annexe 11. Tableaux et graphiques des résultats principaux

Comparaison des sous-catégories ressources fossiles et ressources minérales

Nous allons uniquement présenter les résultats en ce qui concerne le système CBR Lixhe.

Catégorie	Ressources fossiles	Ressources minérales
Score caractérisé	1,28E+02	3,12E-01
Score normalisé	1,52E-02	3,71E-05
Score pondéré	3,05E+00	7,42E-03

Tableau X.41 Comparaison des scores pour les sous-catégories Ressources fossiles et minérales

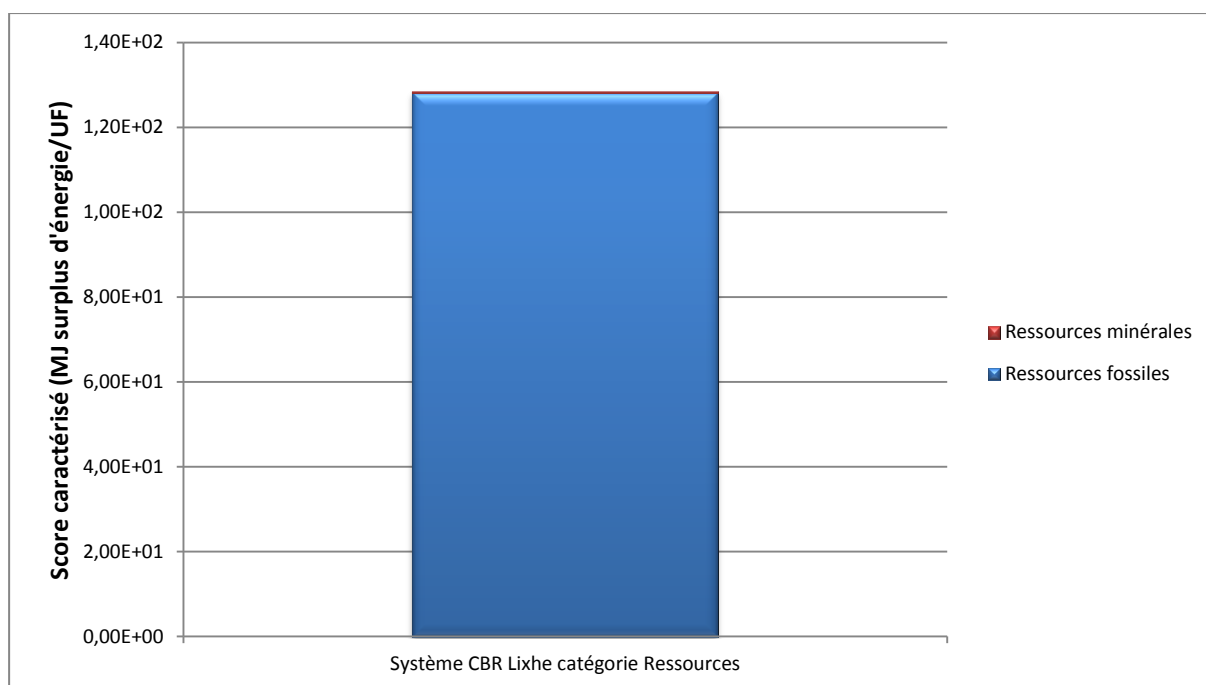


Figure X.1 Scores caractérisés du système CBR Lixhe pour la catégorie « Ressources »

A la suite du Tableau X.41 et de la Figure X.1, nous voyons que les ressources minérales représentent un impact négligeable sur le score global. Nous n'avons plus pris en compte cette sous-catégorie dans les résultats.

Systèmes envisagés

Systèmes envisagés	Cancers	Effets respiratoires organiques	Effets respiratoires inorganiques	Changements climatiques	Ecotoxicité	Acidification-Eutrophisation	Ressources
Système CBR Lixhe	5,48E-05	3,35E-09	1,83E-04	1,56E-04	2,64E+00	8,51E+00	1,28E+02
Système BREF charbon	1,49E-04	5,82E-09	5,70E-04	1,84E-04	2,11E+00	2,11E+01	1,37E+02
Système SimaPro7.1	9,50E-05	7,66E-09	1,85E-04	1,61E-04	1,96E+00	7,42E+00	2,57E+02

Tableau X.42 Scores caractérisés des différents systèmes envisagés dans l'unité appropriée

Systèmes envisagés	Cancers	Effets respiratoires organiques	Effets respiratoires inorganiques	Changements climatiques	Ecotoxicité	Acidification-Eutrophisation	Ressources
Système CBR Lixhe	3,56E-03	2,18E-07	1,19E-02	1,01E-02	5,14E-04	1,66E-03	1,52E-02
Système BREF charbon	9,67E-03	3,78E-07	3,70E-02	1,11E-02	4,12E-04	4,12E-03	1,64E-02
Système SimaPro7.1	6,17E-03	4,97E-07	1,20E-02	1,05E-02	3,83E-04	1,45E-03	3,06E-02

Tableau X.43 Scores normalisés des différents systèmes envisagés

Systèmes envisagés	Cancers	Effets respiratoires organiques	Effets respiratoires inorganiques	Changements climatiques	Ecotoxicité	Acidification-Eutrophisation	Ressources
Système CBR Lixhe	1,42E+00	8,71E-05	4,76E+00	4,03E+00	2,06E-01	6,63E-01	3,05E+00
Système BREF charbon	3,87E+00	1,51E-04	1,48E+01	4,45E+00	1,65E-01	1,65E+00	3,27E+00
Système SimaPro7.1	2,47E+00	1,99E-04	4,80E+00	4,19E+00	1,53E-01	5,79E-01	6,12E+00

Tableau X.44 Scores pondérés des différents systèmes envisagés

Polluants à effets cancérigènes

Composé	Système CBR Lixhe	Système BREF charbon	Système SimaPro7.1
Acétaldéhyde (air)	3,08E-13	5,88E-13	1,20E-12
As (air)	9,04E-07	7,27E-07	4,84E-07
Cd (air)	3,58E-06	1,17E-06	1,50E-06
Cr (VI) air	2,67E-06	2,70E-06	3,77E-06
Dioxines (air)	3,14E-06	8,93E-05	1,66E-06
Ni (air)	2,15E-06	2,92E-06	1,11E-06
PAH (air)	2,29E-09	2,71E-09	1,67E-09
As (eau)	8,58E-07	1,03E-06	1,63E-06
Cd (eau)	3,28E-07	4,04E-07	7,92E-07
Cr (Vi) (eau)	3,57E-05	4,43E-05	6,89E-05
Ni (eau)	5,13E-06	5,65E-06	1,42E-05
PAH (eau)	7,30E-09	8,97E-09	2,61E-08
As (sol)	7,84E-10	1,18E-09	2,79E-09
Cd (sol)	2,04E-10	2,09E-10	3,09E-10
Cr (sol)	3,50E-07	4,57E-07	9,43E-07
Ni (sol)	1,81E-09	1,84E-09	2,66E-09

Tableau X.45 Scores caractérisés des différents polluants à effets cancérigènes

Polluants à effets respiratoires inorganiques

Composé	Système CBR Lixhe	Système BREF charbon	Système SimaPro7.1
Ammoniac	1,10E-06	1,71E-06	2,12E-06
NO _x	1,25E-04	2,73E-04	1,02E-04
Poussières <2,5µm	2,19E-05	6,82E-05	3,42E-05
2,5µm<Poussières<10µm	2,13E-05	5,84E-05	2,35E-05
SO _x	1,43E-05	1,69E-04	2,28E-05

Tableau X.46 Scores caractérisés des différents polluants à effets respiratoires inorganiques

Polluants entraînant les changements du climat

Composé	Système CBR Lixhe	Système BREF charbon	Système SimaPro7.1
CO ₂ (fossile)	1,54E-04	1,82E-04	1,59E-04
N ₂ O	1,61E-07	1,74E-07	1,54E-07
Méthane	1,15E-06	2,00E-06	2,63E-06

Tableau X.47 Scores caractérisés des différents polluants entraînant des changements climatiques

Ressources

Composé	Système CBR Lixhe	Système BREF charbon	Système SimaPro7.1
Charbon Noir	2,03E+01	3,78E+01	1,29E+01
Charbon Brun	1,77E-01	3,49E-01	7,26E-01
Gaz Naturel	6,67E+01	4,69E+01	4,76E+01
Pétrole brut	4,10E+01	5,23E+01	1,96E+02

Tableau X.48 Scores caractérisés pour les ressources

Etapas du système CBR Lixhe

Etape	Santé humaine	Qualité de l'écosystème	Ressources	Total
Four	8,18E+00	7,36E-01	9,91E-01	9,90E+00
Transport 1	5,80E-01	4,42E-02	3,54E-01	9,78E-01
Mouture	7,57E-01	4,38E-02	9,14E-01	1,71E+00
Transport 2	1,60E-01	1,22E-02	9,77E-02	2,70E-01
Electricité	5,56E-01	3,30E-02	6,91E-01	1,28E+00

Tableau X.49 Scores pondérés des différentes étapes du système CBR Lixhe

Etapas du système BREF charbon

Etape	Santé humaine	Qualité de l'écosystème	Ressources	Total
Four	2,11E+01	1,66E+00	1,91E+00	2,47E+01
Transport 1	3,35E-02	2,51E-03	1,96E-02	5,57E-02
Mouture	7,57E-01	4,38E-02	9,14E-01	1,71E+00
Transport 2	1,47E-01	1,12E-02	9,01E-02	2,49E-01
Electricité	1,36E+00	9,03E-02	3,34E-01	1,79E+00

Tableau X.50 Scores pondérés des différentes étapes du système BREF charbon

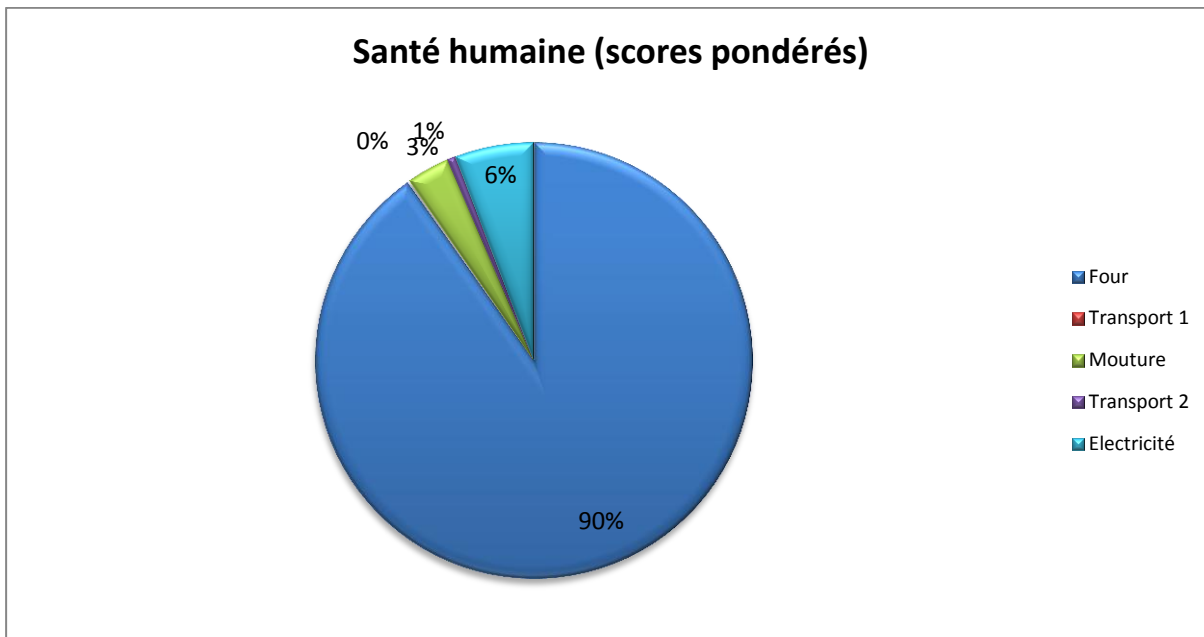


Figure X.2 Répartition des différentes étapes du système BREF charbon pour la « Santé humaine »

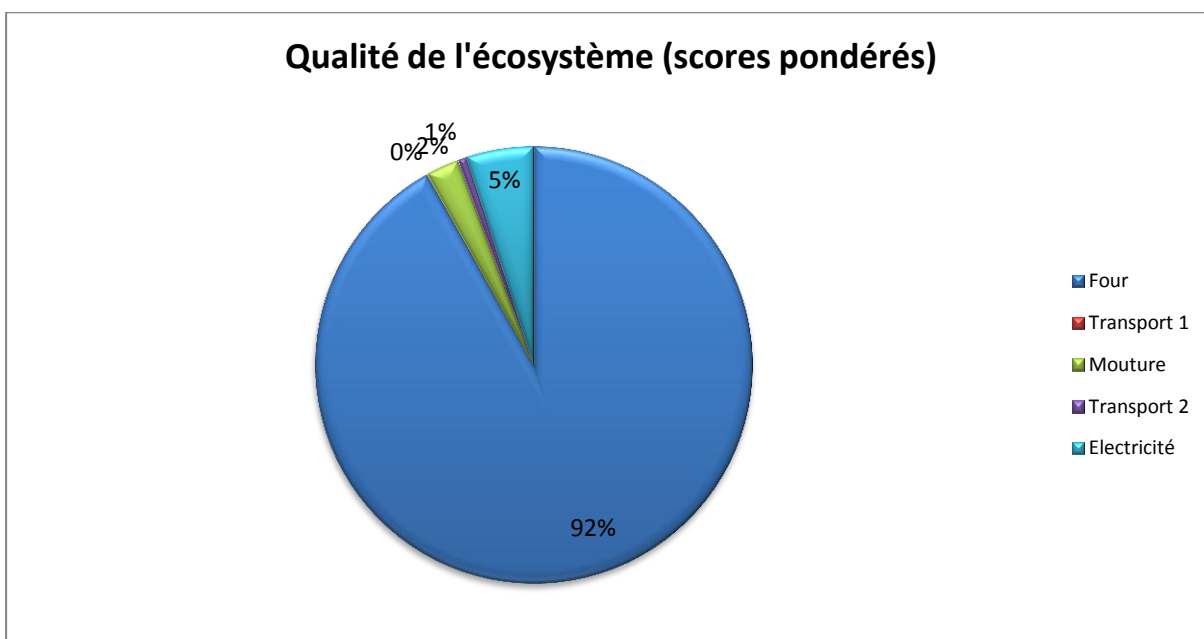


Figure X.3 Répartition des différentes étapes du système BREF charbon pour la « Qualité de l'écosystème »

Etapas du système SimaPro7.1

Étape	Santé humaine	Qualité de l'écosystème	Ressources	Total
Ciment	1,03E+01	6,52E-02	5,33E+00	1,57E+01
Incineration	8,26E-01	5,82E-03	3,34E-01	1,05E+00
Electricité	3,65E-01	2,16E-03	4,54E-01	8,21E-01

Tableau X.51 Scores pondérés des différentes étapes du système SimaPro7.1

Annexe 12. Tableaux et graphiques de résultats pour l'analyse de sensibilité du système

Système CBR Lixhe

Systèmes envisagés	Cancers	Effets respiratoires organiques	Effets respiratoires inorganiques	Changements climatiques	Ecotoxicité	Acidification-Eutrophisation	Ressources
CBR Lixhe Moyen	3,56E-03	2,18E-07	1,19E-02	1,01E-02	5,14E-04	1,66E-03	1,52E-02
CBR Lixhe Bas	3,23E-03	2,18E-07	1,05E-02	1,01E-02	3,39E-04	1,42E-03	1,52E-02
CBR Lixhe Haut	4,21E-03	2,18E-07	1,36E-02	1,01E-02	9,05E-04	1,92E-03	1,52E-02

Tableau X.52 Scores normalisés des différents systèmes CBR Lixhe

Systèmes envisagés	Cancers	Effets respiratoires organiques	Effets respiratoires inorganiques	Changements climatiques	Ecotoxicité	Acidification-Eutrophisation	Ressources	Total
CBR Lixhe Moyen	1,42E+00	8,71E-05	4,76E+00	4,04E+00	2,06E-01	6,63E-01	3,05E+00	1,41E+01
CBR Lixhe Bas	1,29E+00	8,71E-05	4,20E+00	4,03E+00	1,36E-01	5,68E-01	3,05E+00	1,33E+01
CBR Lixhe Haut	1,68E+00	8,71E-05	5,46E+00	4,03E+00	3,62E-01	7,66E-01	3,05E+00	1,53E+01

Tableau X.53 Scores pondérés des différents systèmes CBR Lixhe

Composé	CBR Lixhe Moyen	CBR Lixhe Bas	CBR Lixhe Haut
Acéaldéhyde (air)	3,08E-13	3,08E-13	3,09E-13
As (air)	9,04E-07	6,63E-07	1,58E-06
Cd (air)	3,58E-06	1,50E-06	7,40E-06
Cr (VI) air	2,67E-06	2,15E-06	4,11E-06
Dioxines (air)	3,14E-06	1,13E-06	6,51E-06
Ni (air)	2,15E-06	1,92E-06	2,80E-06
PAH (air)	2,29E-09	2,29E-09	2,29E-09
As (eau)	8,58E-07	8,58E-07	8,62E-07
Cd (eau)	3,28E-07	3,28E-07	3,31E-07
Cr (VI) (eau)	3,57E-05	3,57E-05	3,59E-05
Ni (eau)	5,13E-06	5,13E-06	5,15E-06
PAH (eau)	7,30E-09	7,30E-09	7,34E-09
As (sol)	7,84E-10	7,84E-10	7,90E-10
Cd (sol)	2,04E-10	2,04E-10	2,08E-10
Cr (sol)	3,50E-07	3,50E-07	3,55E-07
Ni (sol)	1,81E-09	1,81E-09	1,84E-09

Tableau X.54 Scores caractérisés des polluants à effets cancérigènes des différents systèmes CBR

Composé	CBR Lixhe Moyen	CBR Lixhe Bas	CBR Lixhe Haut
Ammoniac	1,10E-06	1,10E-06	1,10E-06
NO _x	1,25E-04	1,06E-04	1,45E-04
Poussières <2,5µm	2,19E-05	2,06E-05	2,54E-05
2,5µm<Poussières<10µm	2,13E-05	2,02E-05	2,40E-05
SO _x	1,43E-05	1,42E-05	1,45E-05

Tableau X.55 Scores caractérisés des polluants à effets respiratoires inorganiques des différents systèmes CBR

Système BREF charbon

Systèmes envisagés	Cancers	Effets respiratoires organiques	Effets respiratoires inorganiques	Changements climatiques	Ecotoxicité	Acidification-Eutrophisation	Ressources
BREF moyen	3,86E+00	1,51E-04	1,48E+01	4,78E+00	1,65E-01	1,65E+00	3,27E+00
BREF bas	2,33E+00	1,51E-04	3,78E+00	4,78E+00	1,12E-01	4,37E-01	3,27E+00
BREF haut	5,39E+00	1,51E-04	2,58E+01	4,78E+00	2,17E-01	2,86E+00	3,27E+00
Draft	5,00E+00	1,51E-04	1,47E+01	4,78E+00	8,93E-01	1,37E+00	3,26E+00

Tableau X.56 Scores pondérés pour les différents systèmes BREF Charbon envisagés

Composé	BREF moyen	BREF Bas	BREF Haut	Draft
Acétaldéhyde (air)	5,88E-13	5,88E-13	5,88E-13	5,89E-13
As (air)	7,27E-07	3,42E-07	1,11E-06	8,97E-06
Cd (air)	1,17E-06	1,17E-06	1,17E-06	5,92E-05
Cr (VI) air	2,70E-06	1,18E-06	4,23E-06	1,96E-05
Dioxines (air)	8,93E-05	3,27E-05	1,46E-04	4,26E-05
Ni (air)	2,92E-06	2,55E-06	3,28E-06	1,08E-05
PAH (air)	2,71E-09	2,71E-09	2,71E-09	2,71E-09
As (eau)	1,03E-06	1,03E-06	1,03E-06	1,03E-06
Cd (eau)	4,04E-07	4,04E-07	4,04E-07	4,06E-07
Cr (Vi) (eau)	4,43E-05	4,43E-05	4,43E-05	4,45E-05
Ni (eau)	5,65E-06	5,65E-06	5,65E-06	5,67E-06
PAH (eau)	8,97E-09	8,97E-09	8,97E-09	9,01E-09
As (sol)	1,18E-09	1,18E-09	1,18E-09	1,19E-09
Cd (sol)	2,09E-10	2,09E-10	2,09E-10	2,12E-10
Cr (sol)	4,57E-07	4,57E-07	4,57E-07	4,61E-07
Ni (sol)	1,84E-09	1,84E-09	1,84E-09	1,87E-09

Tableau X.57 Scores caractérisés des polluants à effets cancérigènes pour les systèmes BREF Charbon envisagés

Composé	BREF moyen	BREF Bas	BREF Haut	Draft
Ammoniac	1,71E-06	1,71E-06	1,71E-06	1,71E-06
NO _x	2,73E-04	7,68E-05	4,69E-04	2,02E-04
Poussières <2,5µm	6,82E-05	2,51E-05	1,11E-04	7,32E-05
2,5µm<Poussières<10µm	5,84E-05	2,38E-05	9,31E-05	6,24E-05
SO _x	1,69E-04	1,82E-05	3,19E-04	2,26E-04

Tableau X.58 Scores caractérisés des polluants à effets respiratoires inorganiques pour les systèmes BREF Charbon envisagés

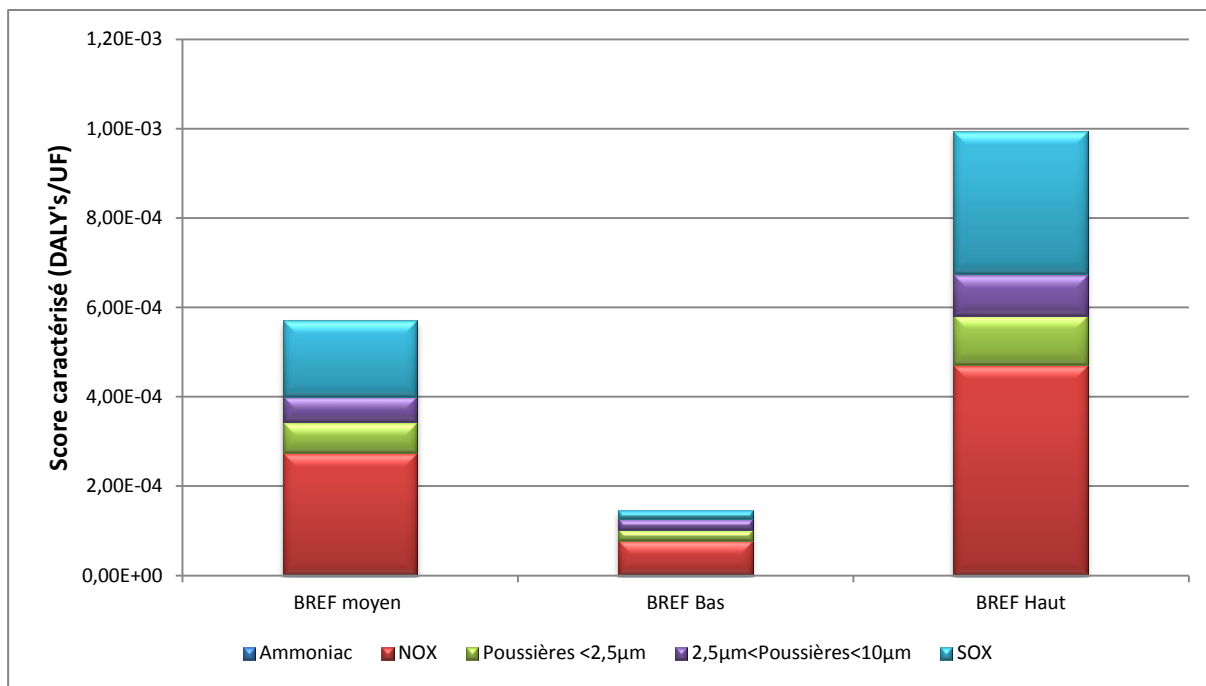


Figure X.4 Polluants à effets respiratoires inorganiques pour les systèmes BREF Charbon envisagés

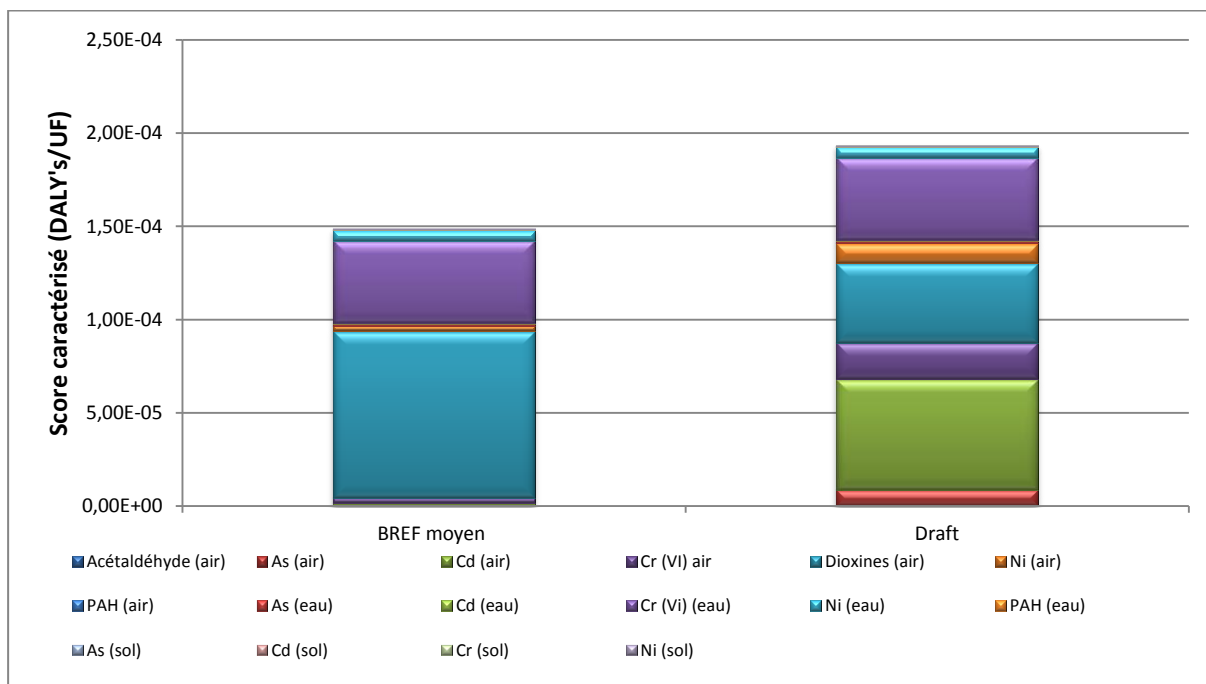


Figure X.5 Polluants à effets cancérigènes pour le BREF moyen et le Draft

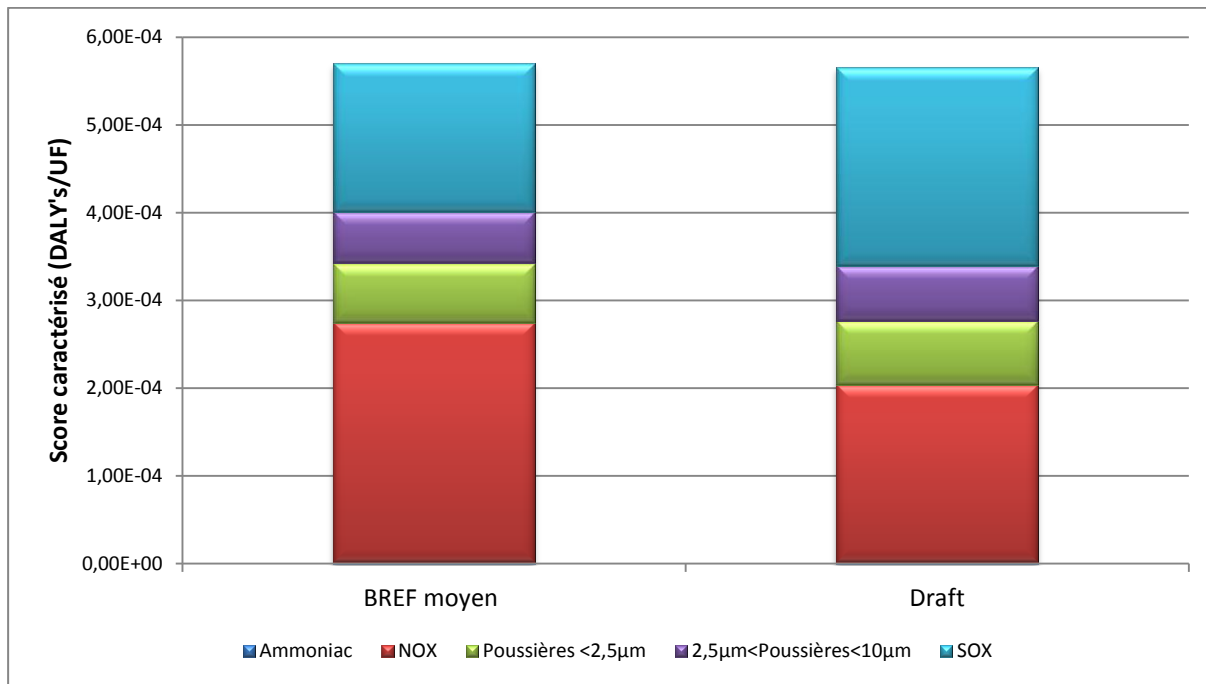


Figure X.6 Polluants à effets respiratoires inorganiques pour le BREF moyen et le Draft

Annexe 13. Tableaux et graphiques de résultats pour l'analyse de sensibilité de la méthode

Perspective envisagée	Santé humaine			Qualité de l'écosystème			Ressources		
	Système CBR Lixhe	Système BREF Charbon	Système SimaPro7.1	Système CBR Lixhe	Système BREF Charbon	Système SimaPro7.1	Système CBR Lixhe	Système BREF Charbon	Système SimaPro7.1
Hiérarchiste	1,02E+01	2,34E+01	1,15E+01	8,69E-01	1,81E+00	7,32E-01	3,05E+00	3,27E+00	6,12E+00
Egalitaire	7,63E+00	1,75E+01	8,55E+00	1,09E+00	2,26E+00	9,17E-01	7,70E+00	1,24E+01	8,47E+00
Individualiste	1,43E+01	2,81E+01	1,73E+01	4,99E-01	1,19E+00	4,31E-01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Tableau X.59 Scores pondérés des différentes catégories pour les systèmes envisagés

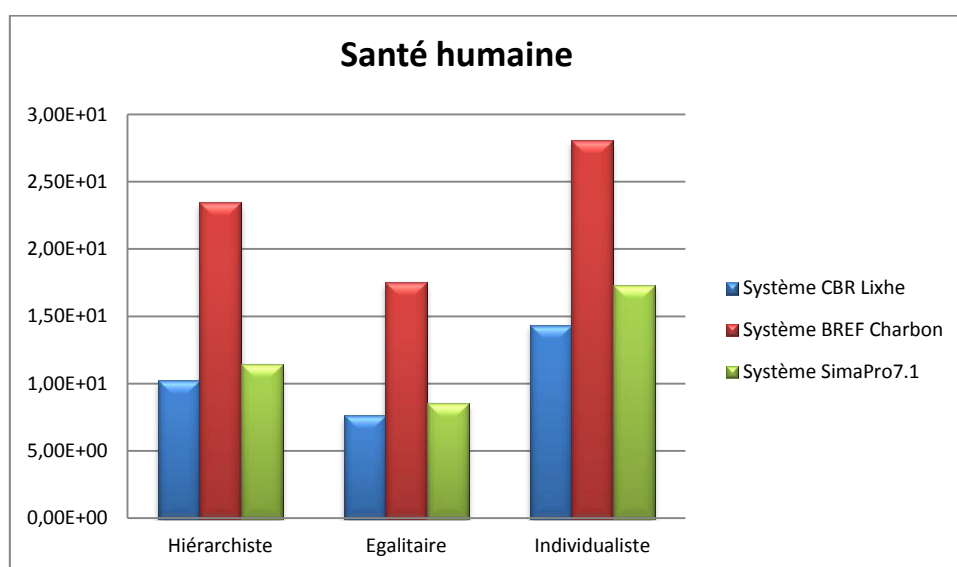


Figure X.7 Scores pondérés de la catégorie « Santé humaine » pour les perspectives envisagées

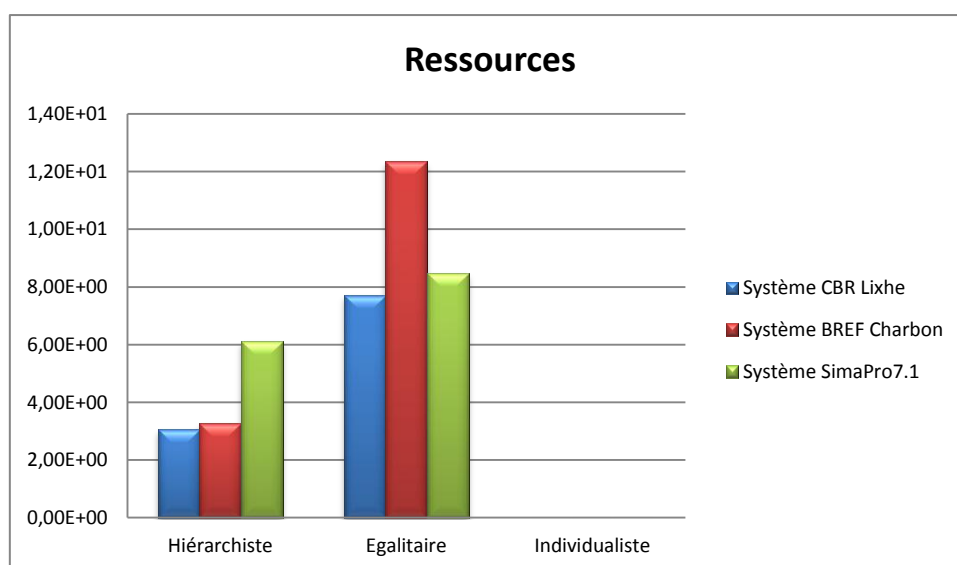


Figure X.8 Scores pondérés de la catégorie « Ressources » pour les perspectives envisagées

