

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

« Quantification des impacts environnementaux de  
la fabrication de chaux à l'aide de l'Analyse Cycle  
de Vie : cas pratique de la société Carmeuse »

Mémoire de fin d'étude présenté par

« Vullo, Sefora »

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

« Finalité Gestion de l'Environnement ENVI4 »

Année académique : 2017-2018

Directeur : Prof. Achten Wouter

## Remerciements

Je tenais tout d'abord à remercier, Monsieur Fabrice Foucart (Directeur de l'Environnement, de la Santé et de la Sécurité chez Carmeuse) pour avoir pris le temps de récolter les données nécessaires à la réalisation de ce mémoire ainsi que d'avoir répondu aux multiples questions concernant le sujet.

Ensuite, je tiens à remercier mon promoteur Monsieur Achten Wouter et Vanessa Zeller pour l'explication du logiciel SIMAPRO ainsi que l'aide apportée pour construire l'Analyse Cycle de Vie du mémoire.

Je remercie également Monsieur Pierre D'Ans, pour m'avoir dirigé dans la conception de ce mémoire.

Pour terminer, je remercie ma famille pour le support moral mais tout particulièrement mon frère, Francesco Vullo, pour avoir participé à la relecture de ce mémoire.

## Résumé

L'Analyse Cycle de Vie (ACV), est une méthode qui mesure et quantifie les impacts environnementaux d'un produit.

La réalisation d'une Analyse Cycle de Vie comporte quatre étapes que sont : le but et les objectifs de l'ACV, la réalisation de l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation de l'impact du cycle de vie à l'aide du logiciel SIMAPRO et l'interprétation de l'Analyse Cycle de Vie.

Afin de réaliser l'Analyse Cycle de vie de la chaux, les données de la société Carmeuse ont été récoltées. La fabrication de chaux comporte plusieurs étapes : l'extraction de la matière première (roche calcaire), le travail de la pierre (dépendance) et la calcination.

Les résultats de l'assemblage des ACV de la fabrication de chaux (carrière, dépendance et production de chaux) de la société Carmeuse montrent que la production de chaux est responsable de 70.7 % des impacts environnementaux, le travail de la pierre pour 19 % et la carrière pour 10.3 %. Les deux catégories d'impact les plus touchées sont le changement climatique et la toxicité humaine non cancérigène.

Les résultats obtenus lors de l'assemblage des ACV de Carmeuse ont été comparés avec une étude similaire réalisée sur une usine basée en Suisse. L'ACV de l'entreprise basée en Suisse montre que la production de chaux est responsable de 63% des impacts environnementaux, la carrière pour 20.4% et le travail de la pierre (dépendance) pour 16.5%. Les deux catégories d'impacts les plus touchées sont également la toxicité humaine non cancérigène et le changement climatique.

La différence de pourcentage entre les deux ACV ainsi que du positionnement de l'extraction de la matière première et de l'étape du travail de pierre sont dus à un manque d'informations en ce qui concerne l'ACV de Carmeuse.

Suite aux résultats de l'ACV, les recommandations globales pour la production de chaux de la société Carmeuse sont les suivantes : optimiser la consommation énergétique en recommandant un four à flux parallèles à régénération car celui-ci consomme moins d'énergie, favoriser le gaz naturel pour alimenter les fours car c'est le combustible le moins impactant et, enfin, réduire les émissions de poussières par l'application de filtres à manches ou encore de dépoussiéreurs électrostatiques.

Mots-clés : Analyse Cycle de Vie (ACV), chaux, extraction, calcaire, carrière, dépendance, calcination, fours, impacts environnementaux, SIMAPRO.

## Summary

Life Cycle Analysis (LCA) is a method that measures and quantifies the environmental impacts of a product.

The realization of a Life Cycle Analysis consists of four stages: the purpose and objectives of the LCA, the realization of the inventory of the life cycle, the assessment of the impact of the life cycle with the help of SIMAPRO software and the interpretation of Life Cycle Analysis.

In order to carry out the Life Cycle Analysis of the lime, the data from the company Carmeuse was collected. The production of lime involves several stages: the extraction of the raw material (limestone rock), the work of the stone (dependence) and the calcination.

The results of the LCA assembly of the lime manufacturing (quarry, dependence and lime production) of the company Carmeuse show that the production of lime is responsible for 70.7% of the environmental impacts, the stone work for 19% and the quarry for 10.3%. The two most impacted categories are climate change and non-carcinogenic human toxicity.

The results obtained during the assembly of Carmeuse's LCA were compared with a similar study carried out on a plant based in Switzerland. The company's LCA in Switzerland shows that lime production is responsible for 63% of environmental impacts, the quarry for 20.4% and rock work (dependence) for 16.5%. The two most impacted categories are non-carcinogenic human toxicity and climate change.

The percentage difference between the two LCAs as well as the positioning of the extraction of the raw material and the step of stone work are due to a lack of information regarding Carmeuse's LCA.

Following the results of the LCA, the global recommendations for the production of lime of the company Carmeuse are as follows: optimize energy consumption by recommending a regenerative parallel flow furnace because it consumes less energy, promote gas natural to feed the furnaces because it is the least impacting fuel and finally, reduce dust emissions by the application of bag filters or electrostatic precipitators.

Keywords: Life Cycle Analysis (LCA), lime, extraction, limestone, quarry, dependence, calcination, kilns, environmental impacts, SIMAPRO.

## Table des matières

Introduction générale.....	8
Méthodologie .....	9
<b>PARTIE THEORIQUE</b> .....	<b>11</b>
Chapitre 1 : Contexte de l'Analyse Cycle de Vie .....	12
1.1 Introduction .....	12
1.2 Historique .....	14
1.3 Définition de l'Analyse Cycle de Vie.....	16
Chapitre 2 : Étapes de l'Analyse Cycle de Vie .....	19
2.1 Définition des objectifs.....	19
2.1.1 Unité fonctionnelle.....	19
2.1.2 Frontière du système .....	19
2.1.3 Systèmes des produits et processus élémentaires .....	21
2.1.4 Méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et types d'impacts.....	21
2.1.5 Limitations ou coupure du système .....	22
2.1.6 Qualité des données récoltées .....	22
2.2 Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV) .....	22
2.3 Evaluation de l'impact du cycle de vie.....	25
2.3.1 La classification .....	25
2.3.2 La caractérisation .....	28
2.3.3 La normalisation .....	28
2.3.4 La pondération .....	28
2.4 Interprétation du cycle de vie .....	29
2.5 Limites de l'Analyse Cycle de Vie.....	30
2.6 Avantages et inconvénients de l'Analyse Cycle de Vie .....	31
2.7 Les outils de l'Analyse du Cycle de Vie .....	33
2.7.1 Les bases de données .....	33
2.7.2 Introduction aux logiciels d'ACV : problématique relative à la modélisation.....	34
2.7.2.1 Modélisation des données et du cycle de vie .....	34
2.7.2.2 Fonctionnalités et spécificités des logiciels d'ACV .....	34
<b>PARTIE PRATIQUE</b> .....	<b>36</b>
Introduction .....	37
Chapitre 3 : Contexte.....	38
3.1 Cas d'étude .....	38
3.2 Fabrication de chaux.....	39

3.2.1	Carrière .....	39
3.2.1.1	La découverte .....	39
3.2.1.2	L'extraction .....	39
3.2.2	Travail de la pierre .....	40
3.2.2.1	Le concassage ou broyage .....	40
3.2.2.2	Le criblage .....	40
3.2.2.3	Le lavage .....	41
3.2.3	La calcination .....	41
3.3	Les principaux impacts environnementaux de la fabrication de chaux .....	42
3.3.1	Les impacts atmosphériques .....	42
3.3.2	Les impacts énergétiques .....	43
3.3.3	Les impacts sur l'eau .....	43
3.3.4	Les impacts du bruit et des vibrations .....	44
3.3.5	Les impacts environnementaux spécifiques aux carrières .....	44
3.3.5.1	L'impact sur le paysage et occupation du sol .....	44
3.3.5.2	L'impact sur la faune et la flore .....	45
3.3.5.3	La génération de déchets .....	46
Chapitre 4 : L'Analyse Cycle de Vie .....		47
4.1	Définition des objectifs .....	47
4.1.1	Unité fonctionnelle .....	47
4.1.2	Frontière du système .....	48
4.1.3	Systèmes des produits et processus élémentaires .....	49
4.1.3.1	Les flux énergétiques entrants .....	49
4.1.3.2	Les flux atmosphériques sortants .....	50
4.1.3.3	Les flux entrants et sortants de l'eau .....	51
4.1.4	Méthodologie d'évaluation .....	52
4.1.5	Limitations ou coupure du système .....	52
4.1.6	Qualité des données récoltées .....	53
4.2	Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV) .....	53
4.3	Evaluation de l'Analyse Cycle de Vie .....	56
4.3.1	Analyse Cycle de Vie de la carrière .....	56
4.3.2	Analyse Cycle de Vie du travail de la pierre .....	59
4.3.3	Analyse Cycle de Vie de la production de chaux .....	61
4.3.4	Assemblage des Analyses Cycle de Vie .....	63
4.3.5	Analyse Cycle de Vie générale .....	65

4.4 Comparaison.....	66
Chapitre 5 : Pistes d'amélioration .....	69
Conclusion.....	72
Bibliographie.....	75
ANNEXES .....	79
Annexe 1 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de la carrière.....	80
Annexe 2 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie du travail de la pierre.....	81
Annexe 3 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de la production de chaux .....	82
Annexe 4 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de l'Assemblage des ACV .....	83
Annexe 5 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie générale .....	84
Annexe 6 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de l'Assemblage des ACV Suisse.....	85

## **Introduction générale**

Les problèmes environnementaux globaux comme le changement climatique, la destruction de la couche d'ozone, les pluies acides, la diminution de la biodiversité ou encore la désertification sont caractérisés par une dimension mondiale ainsi qu'une incertitude sur leur évolution et leurs conséquences (Laborieux Elie, 2009).

Avec la prise de conscience grandissante de ces problèmes environnementaux, depuis quelques années, l'intégration d'une gestion de l'environnement des pratiques industrielles devient de plus en plus importante. C'est pourquoi divers outils d'évaluation environnementale se sont développés, tels que l'analyse des risques environnementaux, l'analyse des flux de matière, l'empreinte écologique, etc. Ces outils apportent, aux acteurs du domaine public et privé des réponses nécessaires à la prise de décisions (Thériault. N., 2011). L'Analyse Cycle de Vie (ACV) fait partie de ces multiples outils et elle est de plus en plus utilisée par l'industrie privée et le secteur public.

Bien que l'Analyse Cycle de vie soit un outil largement répandu, l'ACV de la production de chaux est limitée (Sagastume Gutiérrez et al., 2012). En effet, la seule étude d'ACV de la fabrication de chaux trouvée donne l'inventaire du cycle de vie de la production de chaux par rapport à une usine produisant de la chaux hydratée basée en Suisse.

Ce travail de fin d'études sera donc consacré à la réalisation de l'Analyse Cycle de Vie de la production de chaux de la société Carmeuse, située en Belgique, allant de l'exploitation de la matière première jusqu'au site de production.

## Méthodologie

L'objectif de ce mémoire est de mesurer et quantifier les impacts environnementaux de la fabrication de chaux, à l'aide d'un outil, qu'est l'Analyse Cycle de Vie (ACV).

Pour répondre à cet objectif, le mémoire sera divisé en deux parties. Dans un premier temps, une partie théorique expliquant ce qu'est l'outil Analyse Cycle de vie sera développé. Grâce à une revue de littérature intégrant plusieurs auteurs, un état de l'art sera rédigé sur l'ACV afin de mieux aborder la partie pratique du mémoire.

En ce qui concerne la partie pratique, celle-ci sera également scindée en deux parties. Premièrement, une partie sur la fabrication de la chaux où les différents impacts environnementaux seront explicités, à l'aide de la littérature scientifique. Deuxièmement, un cas d'étude va être mis en avant. En effet, l'Analyse Cycle de Vie de la fabrication de chaux de la société Carmeuse, qui est l'une des entreprises belges leader dans la production de chaux, va être réalisée.

Pour ce qui est du cas d'étude, lors d'une Analyse Cycle de Vie, un certain nombre de données sont nécessaires afin de construire l'ACV. Pour ce faire, l'entreprise Carmeuse a fourni la plupart des données (flux énergétiques, flux massiques entrants et sortants du système) demandées. Carmeuse n'a pas pu donner toutes les données demandées car il faut énormément de temps pour les récolter ou parce que Carmeuse ne possède pas certaines données car celles-ci ne sont pas mesurées ou pas connues. Le manque de données est l'une des limites de l'Analyse Cycle de vie réalisée.

Une fois les informations récoltées auprès de Carmeuse, l'utilisation d'un logiciel pour quantifier les impacts environnementaux est nécessaire afin de réaliser l'ACV. Le logiciel choisi pour faire l'ACV est SIMAPRO version 8.4, ce logiciel étant accessible sur demande à l'ULB. De plus, depuis 1990, ce logiciel d'ACV est le plus vendu dans le monde (EVEA, 2018). Il permet d'avoir une garantie de rigueur scientifique et de transparence de données, intégrant les dernières méthodes (midpoint, endpoint...) et bases de données disponibles (Ecoinvent, Gabi...).

En ce qui concerne la base de données, la *database* « Ecoinvent.3 », qui est la dernière version, a été sélectionnée dans le logiciel. Ecoinvent s'appuie sur plus de 20 ans d'expérience dans le développement de la méthodologie ACV et la compilation de données ICV (inventaire de cycle de vie) pour différents secteurs industriels. En effet, avec plus de 13 300 données ICV dans de

nombreux domaines tels que l'énergie, l'agriculture, les transports, les biocarburants et les biomatériaux, les produits chimiques de masse et spéciaux, les matériaux de construction, le bois et le traitement des déchets, Ecoinvent est la base de données la plus complète au niveau mondial. Depuis 2003, Ecoinvent a permis aux entreprises de mieux fabriquer leurs produits en harmonie avec l'environnement, aux décideurs de mettre en place de nouvelles politiques et aux consommateurs d'adopter des comportements plus respectueux de l'environnement (Ecoinvent, 2018).

Afin de répertorier les flux émis et consommés recensés et récoltés auprès de Carmeuse dans différentes catégories d'impacts, la méthode d'évaluation sélectionnée dans le logiciel SIMAPRO est la méthode « Recipe-midpoint ». Cette méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie « ReCiPe », a été développée entre 2001 et 2008, afin d'harmoniser les approches intermédiaires (midpoint) et de dommages (endpoint) (cf chapitre 2.3.1). ReCiPe calcule les impacts environnementaux pour le territoire européen, exception faite des catégories ayant des impacts globaux (changement climatique, déplétion de la couche d'ozone et consommation des ressources naturelles). Enfin cette méthode est déjà acceptée par les experts de l'ACV (Thériault. N., 2011).

Une fois l'Analyse Cycle de vie de la fabrication de chaux de la société Carmeuse modélisée dans le logiciel SIMAPRO, celle-ci va être comparée avec l'ACV d'une usine se trouvant en Suisse (Kalkfabrik Netstal AG).

Enfin, sur base des résultats observés lors de l'analyse et de l'assemblage des différentes ACV, des recommandations seront proposées afin de minimiser les impacts environnementaux engendrés par la production de chaux au sein du site de Moha (site de production de la société Caremeuse).

# **PARTIE THEORIQUE**

# Chapitre 1 : Contexte de l'Analyse Cycle de Vie

## 1.1 Introduction

Selon Costdoat. S. (2012), au fil du temps, le domaine de l'environnement est devenu un facteur de compétitivité auprès des sociétés et son intégration dans les décisions stratégiques au sein des entreprises bénéficierait même d'une dimension à part entière.

En effet, la nécessité de la fusion entre la compétitivité et la préservation du patrimoine est désormais largement reconnue par la plupart des acteurs économiques comme les pouvoirs publics, les industriels, les consommateurs, les actionnaires, les médecins ainsi que les ONG (Costdoat. S., 2012).

Pour avoir une meilleure vue d'ensemble des problèmes environnementaux, des connaissances plus développées sont nécessaires, notamment sur les impacts liés à la composition, à la fabrication, à l'utilisation et à la fin de vie des produits (Costdoat. S., 2012). Les industries doivent donc intégrer les exigences environnementales aux exigences de la conception des produits comme les coûts, les attentes des clients, la faisabilité technique... Le fait de considérer l'environnement lors de la phase de conception du produit (bien ou service) prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie, s'appelle « l'éco-conception » (figure 1).

Selon l'Université Virtuelle Environnement & Développement Durable (UVED, 2012), l'éco-conception est actuellement une démarche en plein essor. Effectivement, l'éco-conception représente un véritable levier d'innovation et fait disparaître la frontière entre technologie et écologie.

Les différents objectifs de l'éco-conception sont de dématérialiser, c'est-à-dire de ne pas concevoir des produits mais des services (concept de l'économie de la fonctionnalité) ; de réduire au maximum les matériaux pour obtenir la même fonction (minimiser leur diversité et les déchets, utiliser les matériaux recyclés et supprimer les toxiques) ; de réduire la consommation d'énergie, principalement durant la phase d'utilisation ; de concevoir un produit réutilisable, démontable et recyclable (Université Virtuelle Environnement & Développement Durable, 2012).

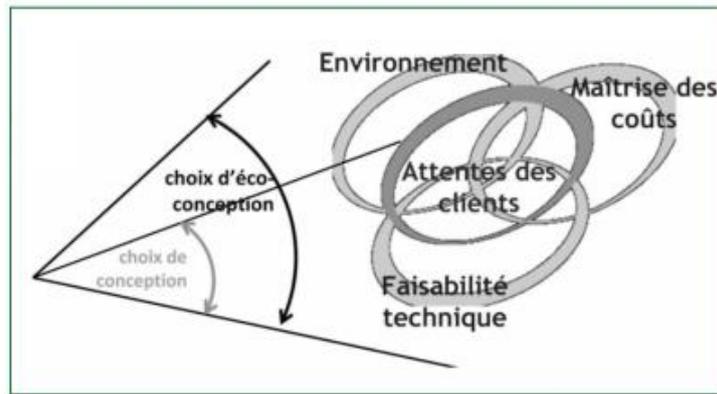


Figure 1: principe de l'éco-conception<sup>1</sup>

C'est dans cet objectif d'éco-conception, que l'analyse cycle de vie (ACV) a été développée. En effet, l'ACV est devenue un outil précieux pour étudier le profil environnemental d'un produit (figure 2).

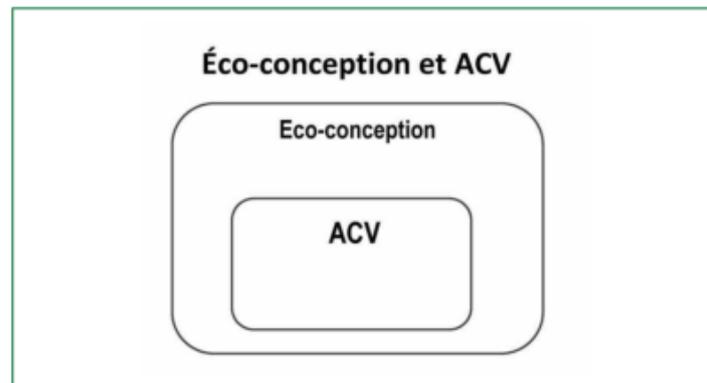


Figure 2: Intégration de l'ACV dans l'éco-conception

Les différentes applications de l'Analyse du Cycle de Vie sont (UVED, 2012) :

- l'éco-conception des produits et des procédés, avec la prise en compte de l'environnement dès leur conception ;
- la sélection du produit ou du procédé le plus respectueux de l'environnement parmi plusieurs solutions proposées (en comparant leurs cycles de vie) ;
- l'amélioration d'un produit ou procédé en termes d'environnement ;
- la gestion d'un procédé grâce au suivi et au contrôle ;
- la proposition de réglementation concernant l'environnement par comparaison d'ACV de plusieurs procédés rendant le même service ;

<sup>1</sup>Source : Costdoat, S. (2012). L'analyse du cycle de vie (ACV) : outil ou contraintes pour la compétitivité des entreprises ? *Annales Des Mines-Réalités Industrielles*, 170(2005), 9–12. <https://doi.org/10.3917/re.066.0013>

- L'obtention de labels dont l'objectif principal est de favoriser les produits qui ont l'impact global jugé le plus faible sur l'environnement à tous les stades de leur vie.

Pour les années à venir, l'évolution de l'Analyse Cycle de Vie permettra d'anticiper une démarche environnementale afin de mieux gérer les contraintes. Ces évolutions peuvent être groupées en trois catégories (UVED, 2012) :

1. réglementaires : les normes ISO (cycle 14000), la directive DEEE, la directive sur les emballages, la directive VHU, etc.
2. techniques : l'essor des technologies propres, des outils bases des données, le développement des systèmes de production type chaîne numérique...
3. économiques : la taxation selon l'impact environnemental, l'amélioration de la qualité des produits ou encore la demande des clients et/ou la pression sociétale.

## 1.2 Historique

Selon Reid et al. (2009) ainsi que Costdoat. S (2012), c'est à la fin des années 60, en Europe du Nord, que les premiers travaux portant sur l'analyse du cycle de vie (ACV) ont été réalisés.

Durant les années 60, la compagnie Coca Cola a réalisé une étude d'Analyse Cycle de Vie ayant construit les bases de la méthodologie ACV telle qu'elle est structurée de nos jours, ce qui a permis à cette étude d'être reconnue comme une référence en raison de son caractère multicritère. En effet, cette étude a été réalisée en tenant compte de plusieurs impacts environnementaux de la fabrication du Coca Cola (Université Virtuelle Environnement & Développement Durable, 2012).

D'après Eggermont. D. (2013), dans les années 70, les buts de l'Analyse Cycle de Vie sont, d'une part, de réduire les consommations énergétiques. En effet, suite à un choc pétrolier<sup>2</sup>, la consommation d'énergie devient, à cette époque, la plus grande préoccupation des entreprises. D'autre part, il faut aussi de minimiser l'utilisation des matières premières.

---

<sup>2</sup> En 1973, au terme d'une grave crise internationale au Moyen-Orient, le prix du baril de pétrole passe de 3 dollars à 10 dollars. Cette hausse, orchestrée par l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP), a été rendue possible par la tension très forte de la demande des pays industriels. Encyclopædia Universalis (2018), [https://www.universalis.fr/encyclopedie/premier-choc-petrolier/#i\\_19953](https://www.universalis.fr/encyclopedie/premier-choc-petrolier/#i_19953), consulté le 6/05/2018

La principale difficulté était d'obtenir des résultats utilisables d'un pays à l'autre ou d'une région à l'autre car il n'y avait pas d'homogénéité mais bien une grande diversité dans les données et les méthodes utilisées pour réaliser les ACV (Eggermont. D., 2013).

Ce n'est que dans les années 90, que le développement d'une méthodologie ainsi qu'une homogénéisation des techniques utilisées a réellement été observé (Eggermont. D., 2013 ; Reid et al., 2009 ; Costdoat. S., 2012). En soutien à cette homogénéisation des procédés, la publication des normes internationales ISO va permettre de rendre les résultats plus robustes et fiables. La norme internationale pour mentionner l'Analyse Cycle de Vie est ISO 1404X (Eggermont. D., 2013).

Selon Costdoat. S. (2012), grâce à la conférence de Rio de Janeiro (1992) et du protocole de Kyoto (1997), une prise de conscience a été marquée afin de réduire les impacts environnementaux des activités économiques. En effet, dès 1992, l'intégration de l'environnement dans le développement économique s'est inscrite dans le cadre plus général du développement durable.

En juin 2002, lors de la conférence de Johannesburg, l'ACV a été intégrée dans un rapport rédigé par le World Summit on Sustainable Development<sup>3</sup> (Reid et al., 2009 ; Costdoat. S., 2012). C'est-à-dire que l'environnement est confirmé comme étant l'un des piliers du développement durable.

En 2007, les problèmes environnementaux réunissant l'Etat et la société civile ont été assemblés afin d'inciter une dynamique collective et une mobilisation de la société française (Costdoat. S., 2012).

Enfin, à la suite des négociations de Cancún (2010), les initiatives liées au changement climatique sont nombreuses (diminution des émissions de gaz à effet de serre de 20 %...), ce qui implique encore plus de prise en considération de l'environnement au sein des entreprises (Costdoat. S., 2012).

---

<sup>3</sup> World Summit on Sustainable Development: Le Sommet mondial sur le développement durable a rassemblé plusieurs chefs d'État et de gouvernement, des délégués nationaux et des dirigeants d'organisations non gouvernementales, d'entreprises et d'autres grands groupes pour attirer l'attention du monde entier. United Nation (2018), World Summit on Sustainable Development (WSSD), Johannesburg Summit <https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/wssd> consulté le 8/05/2018

Afin d'avoir une meilleure vue d'ensemble, la figure suivante (figure n°3), reprend les évènements plus marquants de l'Analyse Cycle de Vie.

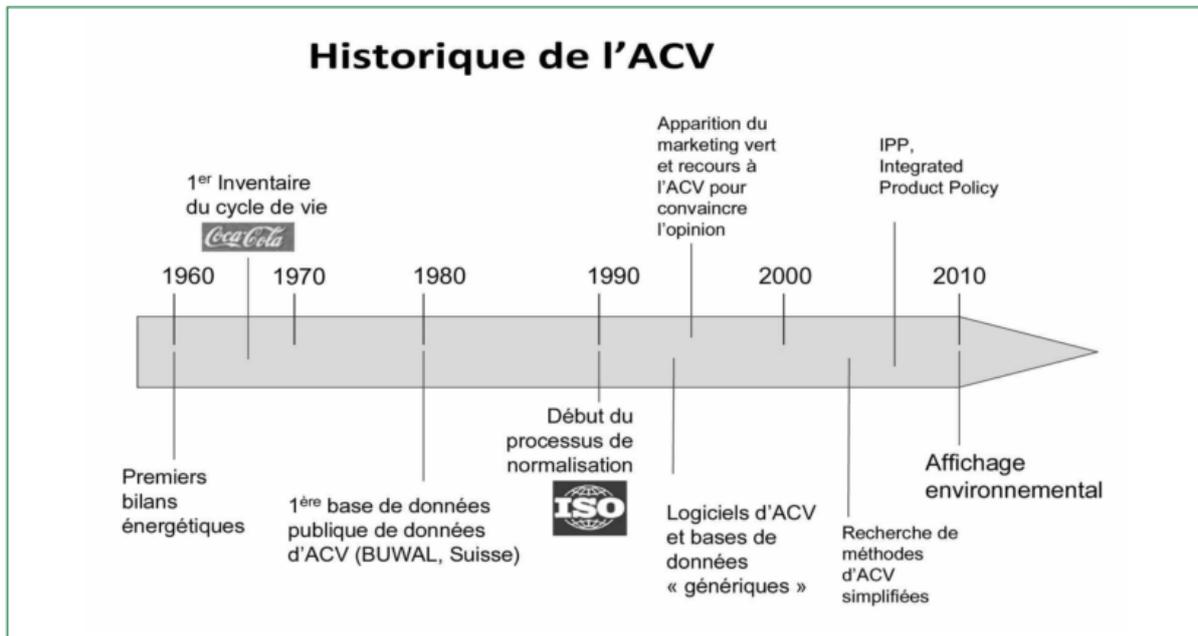


Figure 3: Historique de l'Analyse Cycle de Vie<sup>4</sup>

### 1.3 Définition de l'Analyse Cycle de Vie

L'Analyse Cycle de Vie (ACV) évalue l'impact environnemental d'un système en relation à une fonction particulière. L'ACV est la prise en compte des impacts environnementaux de l'extraction des matières premières nécessaires à son élaboration jusqu'à son élimination en fin de vie, dit du « berceau à la tombe » (Eggermont. D., 2013 ; Reid et al., 2009). En effet, il est essentiel de prendre conscience que tout produit interagit avec son environnement à toutes les étapes de sa vie (Martaud. T., 2009) :

- lors de sa conception, par le choix de matières, de procédés, de concepts ;
- lors de sa fabrication par l'énergie, les matières consommées et les rejets émis ;
- lors de sa distribution par les moyens de transport utilisés ;
- lors de son utilisation par l'énergie et les matières consommées ;

<sup>4</sup> Source : Costdoat, S. (2012). L'analyse du cycle de vie (ACV) : outil ou contraintes pour la compétitivité des entreprises ? Annales Des Mines-Réalités Industrielles, 170(2005), 9–12. <https://doi.org/10.3917/re.066.0013>

- lors de son élimination en fin de vie par les déchets qu'il génère, par l'énergie et les matières consommées pour son traitement et par l'émission de rejets associée à ce traitement.

L'ACV constitue une méthode très complète, notamment parce que le produit ou le service pris en compte inclut tous les processus de conception de celui-ci (de l'extraction de la matière première à la fin de vie du produit ou service). Ce qui permet d'étudier une large gamme d'impacts environnementaux liés aux entrants provenant de l'environnement, comme l'extraction des ressources, et aux sortants émis dans l'environnement, comme les émissions dans l'air, l'eau et le sol (Eggermont. D. 2013 ; Reid et al., 2009).

L'ACV est utilisée principalement pour identifier les opportunités d'amélioration du profil environnemental d'un produit (par une identification des points sensibles). De plus, l'ACV permet de caractériser ou de comparer un système de produits et ses processus unitaires au fil du temps, ainsi que d'indiquer les problèmes environnementaux pour lesquels d'autres techniques peuvent fournir des données et des informations environnementales complémentaires utiles aux décideurs. L'ACV peut être également utilisée dans le cadre du développement des produits, de leur mise en marché et des politiques de développement (Reid et al., 2009 ; Humbert. S. et al., 2015).

D'après Costdoat. S. (2012), l'ACV compose l'une des bases de l'éco-conception de produits et de process permettant de développer la compétitivité d'une entreprise. En effet, cette méthode permet de réaliser les bilans des consommations de ressources naturelles, d'énergie et d'émissions de substances polluantes dans l'environnement (air, eau, sol) du produit ou du service étudié. L'Analyse du Cycle de Vie est donc un outil mis à la disposition des entreprises pour permettre de contribuer activement au développement d'une économie verte.

Selon Martaud. T. (2009), le cadre méthodologique de l'ACV a été normalisé entre 1997 et 2000 par la série de normes ISO 14040 à 14043. Selon ces normes, la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie s'articule en quatre grandes étapes que sont : la définition des objectifs de l'analyse, l'inventaire du cycle de vie, l'analyse des impacts et l'interprétation comme le montre la figure suivante (fig n°4).

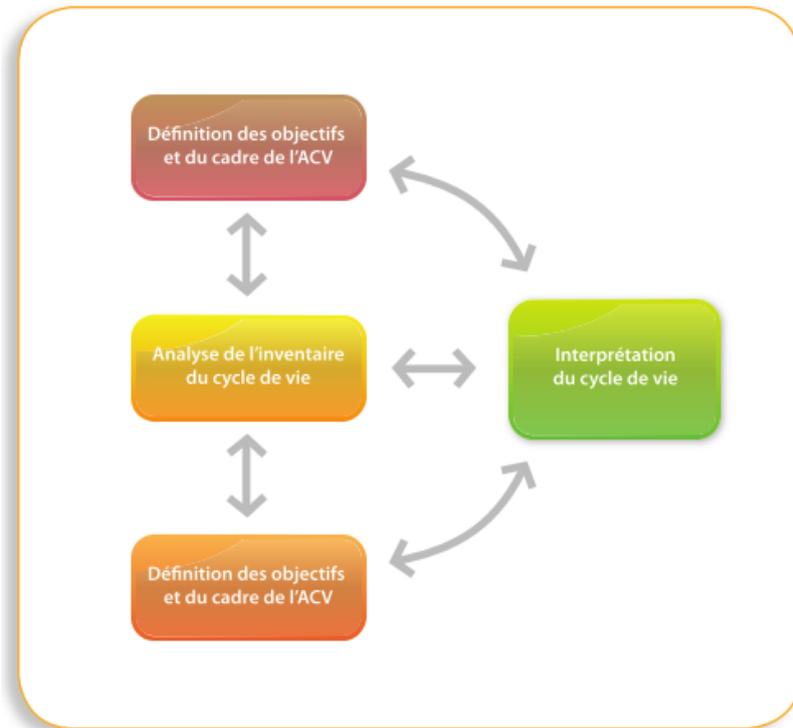


Figure 4: Etapes de l'analyse cycle de vie<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Source : Eggermont, D. (2013). Méthodes d'analyse environnementale - Analyse de cycle de vie, Bilan CO<sub>2</sub>, Empreinte, 30.

## Chapitre 2 : Étapes de l'Analyse Cycle de Vie

Différentes méthodes d'évaluation des impacts environnementaux existent cependant la méthode la plus standardisée et la plus utilisée a été réalisée grâce à une série de normes ISO (Eggermont. D., 2013).

L'ensemble des méthodes s'articule autour de quatre étapes principales.

### 2.1 Définition des objectifs

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2018), la définition des objectifs est l'étape primordiale pour l'Analyse Cycle de Vie. Cette étape permet, d'une part, de définir quels sont les objectifs de l'ACV, en précisant quelle application il en sera fait : écoconception, comparaison ou déclaration environnementale. D'autre part, elle permet aussi de cerner le problème posé et d'envisager les applications de l'analyse (Martaud. T., 2009). En effet, l'objectif d'une étude d'ACV doit préciser l'application envisagée, expliquer les raisons pour lesquelles elle entreprend une ACV ainsi que définir le public à qui sont destinés les résultats (Eggermont. D., 2013). Il est également demandé que le domaine d'application soit suffisamment bien défini pour garantir un équilibre entre l'ampleur, la profondeur et le niveau de détail de l'étude par rapport à l'objectif défini (UVED, 2012). Les éléments suivants seront ainsi inclus dans la première étape de l'ACV :

#### 2.1.1 Unité fonctionnelle

L'« unité fonctionnelle » est l'unité de référence à laquelle les différents flux matériels et énergétiques seront rapportés (Eggermont. D., 2013), ce qui va permettre de comparer des options alternatives sur une même base (Reid et al., 2009). En effet, pour comparer par exemple les impacts environnementaux de deux produits, on ramènera les impacts à une unité de mesure commune (ADEME, 2018).

D'après l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, 2018), une juste définition de l'unité fonctionnelle est indispensable pour rendre les résultats de l'ACV opérationnels et pertinents.

#### 2.1.2 Frontière du système

Selon l'Université Virtuelle Environnement & Développement Durable (UVED, 2012), pour définir les frontières d'un système, il faut considérer les étapes principales de son cycle de vie que sont les processus élémentaires et les flux pris en compte (voir figure ci-dessous) :

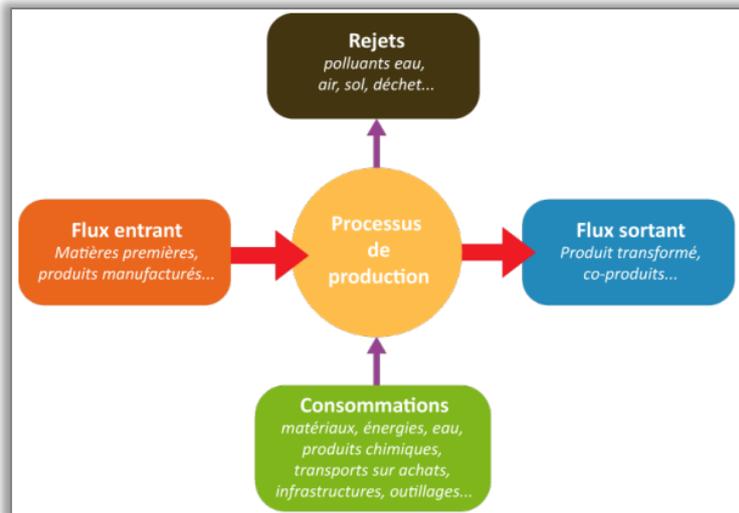


Figure 5: Les intrants/extrants dans une séquence de fabrication (flux)<sup>6</sup>

La suppression de certaines étapes du cycle de vie du système étudié, de processus, ou d'intrants et/ou d'extrants est possible (voir figure ci-dessous). Cependant elle est consentie uniquement si les conclusions de l'étude ne changent pas de manière significative. De plus, toute suppression doit être clairement mentionnée et justifiée (UVED, 2012).

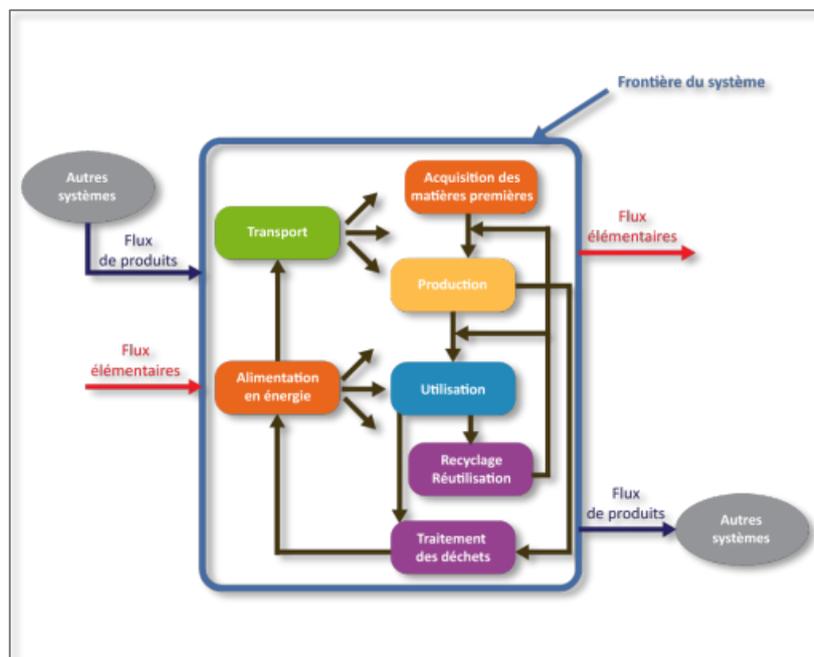


Figure 6: Frontière du système et prise en compte des principaux paramètres relatifs au cycle de vie du système analysé

<sup>6</sup> Source : Université Virtuelle Environnement & Développement Durable (2012), Méthodologie de l'analyse cycle de vie (ACV), France, [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_010\\_acv\\_4.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_010_acv_4.html) , consulté le 27/11/2017

### 2.1.3 Systèmes des produits et processus élémentaires

Dans une étude ACV, le cycle de vie d'un produit est modélisé sous la forme d'un système de produits qui assure une (ou plusieurs) fonctions bien définies. Les systèmes de produits se subdivisent en processus élémentaires. Les flux élémentaires incluent les flux entrants représentés par l'utilisation des ressources (matières premières, énergies) et les flux sortants qui comprennent les émissions dans l'air, l'eau et la terre associées au système. Les flux correspondent donc aux échanges entre, dans un premier temps, le système industriel considéré et les milieux naturels et, dans un second temps, les acteurs au sein du système (UVED, 2012).

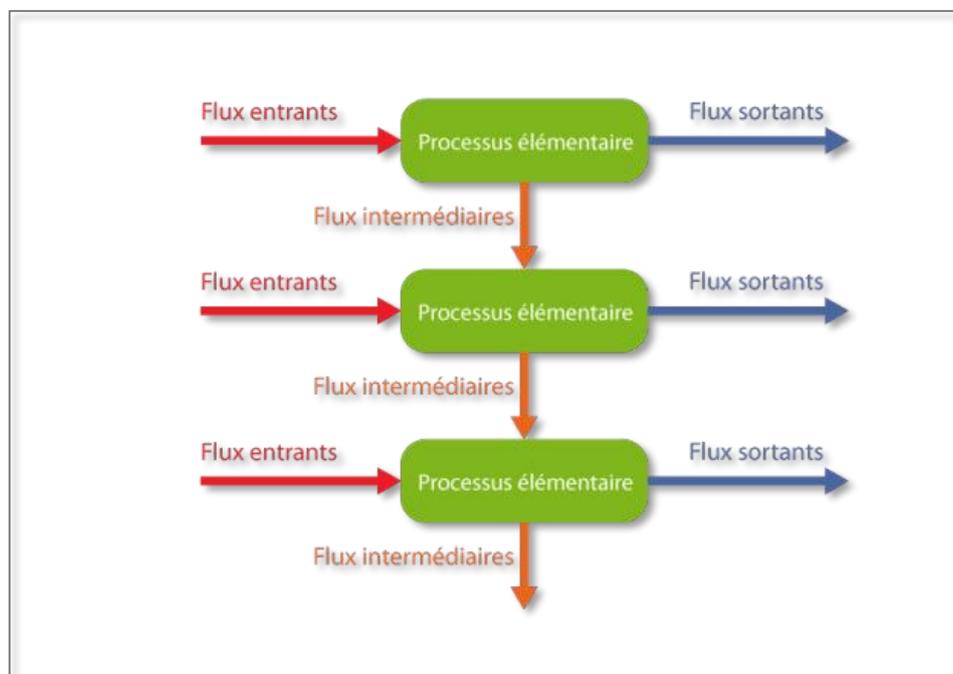


Figure 7: Système des produits et processus élémentaires

### 2.1.4 Méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et types d'impacts

Il existe deux types de méthodes pour l'Analyse Cycle de Vie : l'ACV attributionnelle et l'ACV conséquentielle. L'ACV par attribution est définie en mettant l'accent sur la description des flux physiques pertinents pour l'environnement vers et à partir d'un cycle de vie et de ses sous-systèmes. L'Analyse Cycle de Vie attributionnelle est donc une ACV classique, c'est-à-dire que les impacts environnementaux pris en compte pour effectuer l'ACV se focalisent sur le bien ou le service produit (Finnveden. G. et al., 2009).

L'Analyse Cycle de Vie conséquentielle est plus pertinente pour la prise de décision. L'ACV conséquentielle a une vision plus large, c'est-à-dire que les impacts environnementaux

considérés sont liés à la fabrication du bien (la chaîne de production) et aux conséquences environnementales que ce bien va impacter sur d'autres secteurs (Finnveden. G. et al., 2009).

#### 2.1.5 Limitations ou coupure du système

Il se peut que, lors de la collecte des données, certains flux peuvent être négligés. Pour limiter cette négligence, on utilise une règle de coupure qui permet de simplifier les calculs en définissant les critères d'inclusion ou d'exclusion. La règle de coupure autorise, en effet, des simplifications dans l'inventaire du cycle de vie et propose comme critères d'exclusion des entrants ou des sortants : la masse, l'énergie ou la pertinence environnementale. Le critère de coupure massique est souvent retenu pour sa facilité de mise en pratique (UVED, 2012).

#### 2.1.6 Qualité des données récoltées

Notons qu'il est également important de préciser la qualité des données récoltées en détaillant leur origine afin de permettre d'évaluer la pertinence et la fiabilité de l'étude (Eggermont. D., 2013).

## **2.2 Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV)**

L'inventaire du cycle de vie est un bilan matière-énergie du système de produits tel qu'il a été décrit dans la définition des objectifs (Martaud. T., 2009). Cette étape représente la compilation et la quantification des flux entrants et sortants du système défini ramenés à l'unité fonctionnelle (Eggermont. D., 2013). Ces flux sont répertoriés et classés en fonction de différents facteurs d'impact : les consommations de matières premières, les besoins en énergie et en eau, les rejets atmosphériques et sonores, les rejets dans l'eau, les déchets solides et liquides ainsi que les co-produits (voir figure n°8) (Martaud. T., 2009).

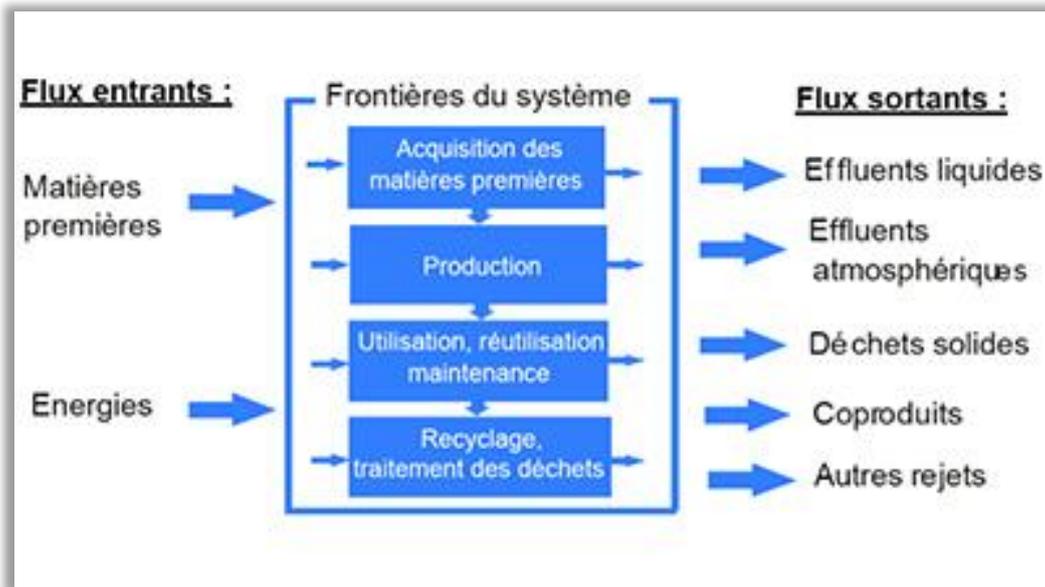


Figure 8 : Flux entrants et flux sortants du système<sup>7</sup>

L'inventaire et son analyse se font en 4 étapes (UVED, 2012) :

1. Quantification des flux (économiques et élémentaires) associés à chaque processus élémentaire ;
2. Mise à l'échelle de ces flux en fonction d'une valeur (flux) de référence ;
3. Quantification des émissions et extractions pour chaque processus élémentaire, le but étant d'identifier tous les éléments qui ont un impact environnemental à chaque étape ;
4. Agrégation des flux élémentaires : toutes les données pour une source d'impact sont agrégées pour calculer les impacts à l'étape suivante. Par exemple, toutes les émissions de CO<sub>2</sub> de tous les processus élémentaires sont additionnées en une seule valeur.

<sup>7</sup> Source : L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME, 2018), <http://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv> consulté le 24-11-2017

Dans le cadre d'une Analyse du Cycle de Vie, des problèmes d'affectation se poseront systématiquement. En effet, pour tous les systèmes remplissant plusieurs fonctions, il sera nécessaire d'affecter la part des flux entrants de produits et services, des flux sortants de déchets et des flux environnementaux qui contribuent uniquement à la fonction étudiée en se basant sur le fait que les systèmes étudiés existent seulement grâce à ces fonctions (UVED,2012).

Il existe trois types de problèmes d'allocation (Finnveden. G. et al., 2009) : la multi-production (dans lequel un processus produit plusieurs sous-produits), les multi-intrants (dans lequel un processus reçoit plusieurs déchets, par exemple, un incinérateur de déchets) et le recyclage en boucle (dans lequel un déchet est recyclé vers un autre produit, par exemple un journal usagé qui est incinéré pour lequel l'énergie sera récupérée sous forme de chaleur et d'électricité). L'allocation est l'un des problèmes méthodologiques les plus discutés dans l'ACV.

C'est pourquoi, lors d'une multi-sortie, il est nécessaire d'éviter l'affectation autant que possible. Si l'affectation est inévitable, il faut la substituer. Il existe deux règles d'affectation. La première règle d'affectation s'applique aux systèmes de produits en circuit fermé. La deuxième règle d'affectation s'applique à des systèmes de produits en circuit ouvert (UVED, 2012). Les règles d'affectation doivent se baser soit sur les propriétés physiques des produits (par exemple la masse) soit sur la valeur économique (par exemple la valeur économique des produits).

L'inventaire de l'ACV comporte deux éléments très importants. Le premier élément est la collecte de données et le second élément est le calcul de l'inventaire (Reid et al., 2009).

Pour la collecte de données, elles peuvent être obtenues par mesure directe, calcul, estimation, par recherche bibliographique ou bien encore issues des banques de données spécialisées (Martaud. T., 2009 ; Reid et al., 2009). Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, 2018), l'inventaire est donc une comptabilité analytique des flux. Pour cela, deux types de données sont collectées : les facteurs d'activité (kWh consommés, km parcourus, tonnes transportées...) et les facteurs d'émission (g de NOx émis dans l'air, g de PO4 émis dans l'eau...). La crédibilité des résultats d'une ACV repose sur la qualité des données de l'inventaire. Cependant, en raison de la difficulté à obtenir les informations nécessaires, la quantification des données est souvent incomplète, manquante voire inexistante (Martaud. T., 2009).

Après avoir récolté les données, des procédures de calcul sont nécessaires pour quantifier les résultats de l'inventaire. Le principe de calcul d'un inventaire est relativement simple, contrairement à la collecte des données qui est une étape assez longue et compliquée. Deux méthodes sont couramment utilisées pour le calcul de l'inventaire (UVED, 2012) :

- l'approche processus, qui consiste à multiplier l'inventaire de production par des facteurs d'émission ou d'extraction. L'inventaire de production regroupe donc les flux intermédiaires correspondant aux processus unitaires du système ainsi que les flux de référence. Les facteurs d'émission et d'extraction sont issus des bases de données et expriment la quantité de chaque substance émise/extraite par unité d'intrant prise en compte ;
- l'approche input-output (entrants-sortants) où l'inventaire se calcule en multipliant les dépenses par unité fonctionnelle avec les facteurs d'émission par unité monétaire dépensée.

## **2.3 Evaluation de l'impact du cycle de vie**

Selon Eggermont. D. (2013), l'évaluation de l'impact du cycle de vie, consiste à transformer l'ensemble des flux recensés durant l'inventaire du cycle de vie en impacts environnementaux via une série d'indicateurs.

Selon les normes en vigueur (ISO), les éléments suivants sont obligatoires pour réaliser l'évaluation de l'impact du cycle de vie :

### **2.3.1 La classification**

La classification consiste à répertorier les flux émis et consommés recensés dans différentes catégories d'impacts (ADEME, 2018 ; UVED, 2012). Pour ce faire, il existe deux méthodes caractérisant les flux inventoriés en indicateurs d'impact environnemental de différents niveaux :

- 1) La méthode dite mid-point, où les impacts considérés apparaissent au milieu de la chaîne de causalité. Cette méthode est dite « orientée problème ». Les substances émises ou consommées ayant des effets similaires sont regroupées dans des catégories d'impact « intermédiaires » (Eggermont. D., 2013). Ces indicateurs d'impact sont composés d'environ 10 à 15 catégories telles que l'extraction des ressources abiotiques, l'utilisation des terres, les changements climatiques, l'appauvrissement de la couche

d'ozone, l'oxydation photochimique, la toxicité humaine, l'écotoxicité et l'acidification... (Reid et al., 2009). Cette méthode est aujourd'hui la méthode la plus reconnue (Eggermont. D., 2013).

- 2) La méthode end-point, où les impacts considérés sont à la fin de la chaîne de causalité. Cette méthode est dite « orientée dommage » (Eggermont. D., 2013). Les résultats de chaque catégorie d'impact peuvent être ensuite regroupés en un nombre plus restreint de catégories telles que la santé humaine, la qualité des écosystèmes ou encore la disponibilité des ressources (Reid et al., 2009).

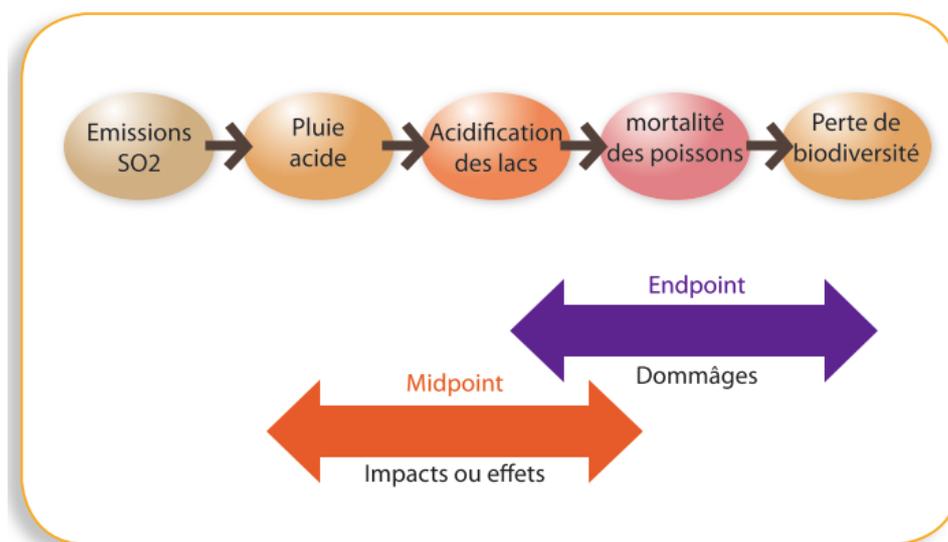


Figure 9: méthodes midpoint et endpoint<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Source : Eggermont, D. (2013). Méthodes d'analyse environnementale - Analyse de cycle de vie, Bilan CO2, Empreinte, 30.

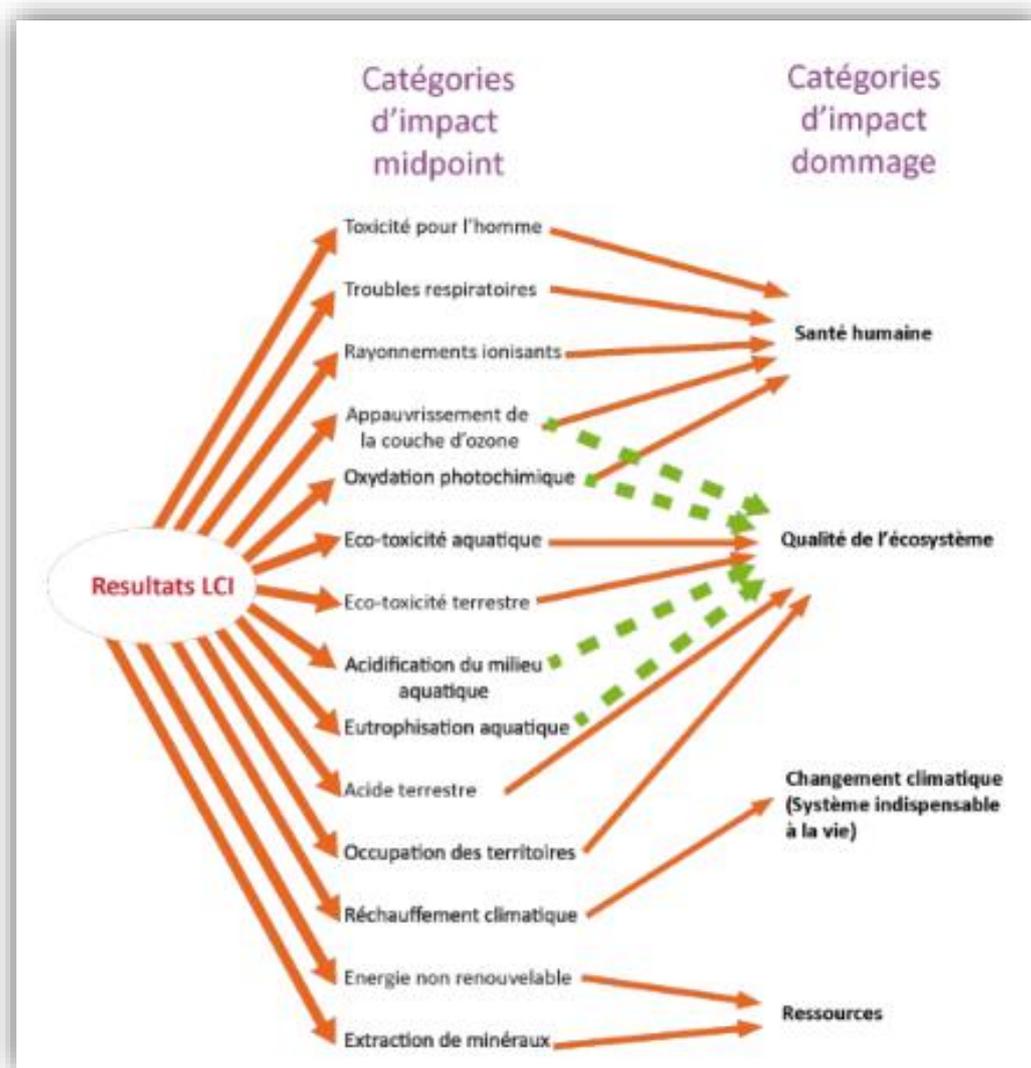


Figure 10: catégories d'impact<sup>9</sup>

Lors de la modélisation du devenir d'une substance, les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) et les catégories d'impact intermédiaires se situent au milieu de la chaîne de causes à effets, tandis que les méthodes d'ÉICV et les catégories d'impact de dommages se trouvent à la fin de cette chaîne. Afin de faciliter la compréhension, une donnée d'inventaire pourrait être l'émission dans l'air de x kg de CO<sub>2</sub>. Cette donnée serait ensuite attribuée à la catégorie d'impact « changement climatique » et sa contribution potentielle aux changements climatiques serait calculée à l'aide d'un facteur de caractérisation. À ce point-ci, l'impact serait de type intermédiaire. Par la suite, il serait possible de traduire cette contribution aux

<sup>9</sup> Source : Université Virtuelle Environnement & Développement Durable (2012), Méthodologie de l'analyse cycle de vie (ACV), France, [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_010\\_acv\\_4.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_010_acv_4.html) , consulté le 27/11/2017

changements climatiques en dommages potentiels sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes. À ce point, l'impact serait de type dommage (Thériault. N., 2011).

### 2.3.2 La caractérisation

La caractérisation consiste à multiplier les différents flux par les facteurs de caractérisation afin de calculer leur contribution aux diverses catégories d'impacts (Eggermont. D., 2013).

Ce calcul implique la conversion des résultats de l'inventaire cycle de vie en unités communes et l'agrégation des résultats convertis au sein de la même catégorie d'impact, à l'aide des facteurs de caractérisation (UVED, 2012).

### 2.3.3 La normalisation

La normalisation consiste à diviser les résultats de la phase de caractérisation par des facteurs de normalisation, ceux-ci étant calculés pour une situation de référence (Eggermont. D., 2013).

La normalisation est donc le calcul de l'importance des résultats d'indicateurs de catégorie par rapport à certaines informations de référence (UVED, 2012).

L'idée de la normalisation est d'analyser la part respective de chaque impact sur le dommage global de la catégorie considérée. Elle facilite l'interprétation des résultats en comparant les différentes catégories sur le même graphique avec les mêmes unités. La normalisation permet également une discussion sur les implications de la pondération. En effet, celle-ci donne une estimation de l'ampleur des facteurs de pondération nécessaires pour discriminer les différentes catégories (Humbert. S. et al., 2015).

### 2.3.4 La pondération

La pondération est l'obtention d'un score unique en fonction de l'importance relative des diverses catégories d'impacts. Les facteurs utilisés pour la pondération étant basés sur des choix personnels ou éthiques, ils rendent cette phase assez subjective (Eggermont. D., 2013). Deux modes opératoires sont possibles (UVED, 2012) :

- Convertir les résultats d'indicateurs ou les résultats normalisés avec des facteurs de pondération sélectionnés ;
- Agréger les résultats d'indicateurs convertis ou normalisés sur l'ensemble des catégories d'impact.

## **2.4 Interprétation du cycle de vie**

L'interprétation du cycle de vie est la dernière phase de l'Analyse Cycle de Vie. Le but de cette dernière étape est d'analyser les résultats obtenus précédemment (Eggermont. D., 2013), de vérifier la cohérence des résultats avec les objectifs et le champ de l'étude (UVED, 2012) ainsi que de tirer des conclusions aux limites de l'étude et fournir des recommandations (Reid et al., 2009).

Enfin, une revue critique peut être faite afin de compléter l'ACV. La revue critique permet de vérifier si l'Analyse du Cycle de Vie a été bien établie par rapport aux exigences de la méthodologie, des données, d'interprétation et de communication. Une revue critique ne peut être effectuée que par un expert interne/externe ou par un comité des parties intéressées. Les commentaires, les recommandations ainsi que la déclaration de revue de l'expert doivent être intégrés dans le rapport de l'ACV (UVED, 2012).

## 2.5 Limites de l'Analyse Cycle de Vie

L'ensemble de la problématique environnementale n'est pas compris dans une Analyse de Cycle de Vie, on parle dans ce cas de comptabilité environnementale. En effet, seuls les aspects quantitatifs (mesurables) et extensifs (sommables) sont pris en compte. L'ACV a donc un champ visuel limité. Par exemple, les ACV ne prennent pas en compte les facteurs sociaux (UVED, 2012 ; Vincent-Sweet, Pénélope, 2012).

Selon la méthodologie actuellement en vigueur, les aspects suivants ne sont pas considérés de façon directe dans les ACV malgré qu'ils soient parfois mesurables (UVED, 2012) :

- l'impact des activités sur les paysages ;
- le bruit ;
- les odeurs ;
- le temps ;
- la toxicité des produits émis (incertitudes importantes).

Cependant, au moyen d'outils complémentaires ainsi qu'à l'évolution des modèles, il y a actuellement des tentatives de construire des grilles d'analyse des impacts sociaux, qui peuvent apporter des éclairages, mais il faut se méfier des tentatives visant à tout chiffrer et à tout cadrer, que ce soit en termes de tonnes de CO<sub>2</sub> ou en termes financiers (UVED, 2012 ; Vincent-Sweet, Pénélope, 2012).

Outre les limites de conception de l'ACV, des limites pratiques peuvent également apparaître pour la réalisation d'une ACV comme le manque de disponibilité des données ainsi que la difficulté de collecter les données, l'influence des résultats par les choix faits par la personne qui a réalisé l'étude ainsi qu'une mauvaise connaissance de l'importance des impacts (UVED, 2012). En effet, les réalisateurs d'ACV rencontrent souvent des problèmes liés au manque de données pour l'un des éléments de l'analyse (voir pour plusieurs). Il leur revient, dès lors, de faire une estimation pertinente des chiffres manquants. Mais l'aspect subjectif de cette estimation rend sa fiabilité douteuse (Vincent-Sweet, Pénélope, 2012).

De nos jours, il n'existe pas de méthode permettant d'envisager de manière satisfaisante les résultats multicritères d'analyses environnementales afin de relativiser ou hiérarchiser l'importance des différents impacts générés (UVED, 2012).

## 2.6 Avantages et inconvénients de l'Analyse Cycle de Vie

L'avantage principal de l'ACV et qui lui donne tout son intérêt, est que l'ACV permet d'avoir une vision plus globale sur l'ensemble du cycle de vie des produits (biens ou services) (Dron. D., 2012). Ce qui donne une perspective plus ample des différents impacts plutôt que de se limiter à un seul type d'impact en particulier (UVED, 2012). Une analyse cycle de vie est donc une approche multicritère comme le montre la figure suivante :

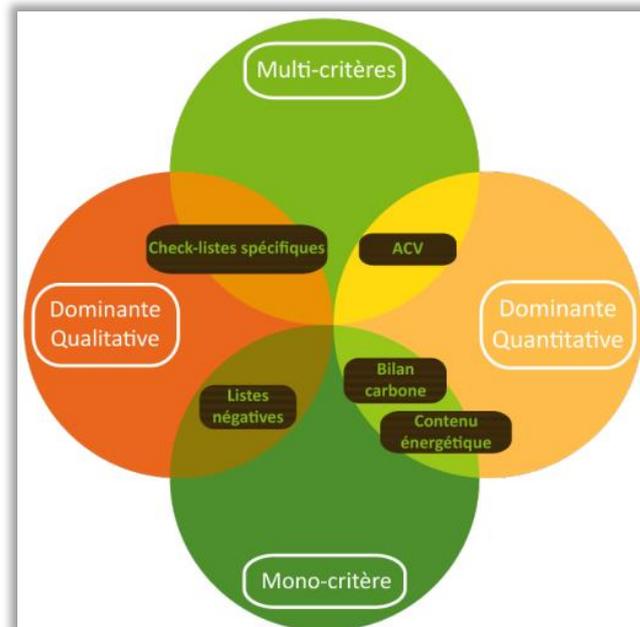


Figure 11 : Approche multicritère<sup>10</sup>

L'Analyse du Cycle de Vie permet également de quantifier les impacts environnementaux potentiels d'un produit grâce à une vision globale sur son cycle de vie. Cette quantification va permettre des comparaisons pertinentes entre des produits, des procédés ou des services (Dron. D., 2012). De plus, grâce à la quantification, il est possible également d'identifier les déplacements de pollution, d'évaluer le type d'impact environnemental dominant dans la réalisation d'un produit, ou encore d'identifier certains éléments particuliers dont la contribution est majeure en termes d'impacts environnementaux (UVED, 2012). L'ACV aide donc à objectiver les impacts connus et quantifiables cumulés tout au long du cycle de vie du fait d'une décision prise (ou à prendre), ce qui fait d'elle un précieux outil d'aide à la décision (Dron. D., 2012).

<sup>10</sup> Source : Université Virtuelle Environnement & Développement Durable (2012), Méthodologie de l'analyse cycle de vie (ACV), France, [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_010\\_acv\\_4.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_010_acv_4.html) , consulté le 27/11/2017

Les résultats de l'Analyse Cycle de Vie peuvent aussi être utilisés en tant qu'argument de vente pour des consommateurs de plus en plus soucieux par rapport à l'avenir de notre planète. De plus, l'ACV peut être utilisé pour des besoins de planification stratégique, d'établissement des priorités, de conception de produits ou de procédés mais également comme élément de marketing, pour créer un système d'étiquetage écologique (affichage environnemental) ou faire une déclaration environnementale relative à un produit (UVED, 2012).

L'Analyse cycle de vie est, pour la plupart des entreprises, une valeur ajoutée, dont les points les plus importants sont les suivants (UVED, 2012) :

1. la valeur ajoutée technique : l'Analyse du Cycle de Vie est l'outil le plus abouti et le plus cadré, notamment par des normes. Il est donc moins discutable et scientifiquement plus pertinent qu'un autre ;
2. la prise en compte des impacts directs et indirects ;
3. l'identification des transferts de pollution ;
4. la capacité de modélisation : en faisant varier plusieurs paramètres, divers scénarios peuvent être étudiés.

L'Analyse Cycle de Vie a également les défauts de ses qualités. C'est-à-dire que certains paramètres ne peuvent pas être quantifiés en totalité comme l'intégration dans un paysage ou l'importance sociétale ou scientifique de l'existence d'un habitat ou d'une espèce lointaine (Dron. D., 2012). En effet, il est quasiment impossible d'obtenir l'intégralité des flux utilisés pour un produit ou de fixer les limites exactes d'un système. De ce fait, il faut parfois faire appel à des données théoriques ou restreindre le périmètre de l'étude en utilisant des données limitées. L'ACV ne pourra pas devenir un outil universel et complet (UVED, 2012).

Le problème de la représentativité géographique est également un inconvénient de l'ACV. En effet l'Analyse Cycle de Vie n'est pas transposable d'une région à une autre ou d'un pays à un autre car les impacts sont différents et parce que c'est un processus long et fastidieux, qui nécessiterait de multiplier les analyses, ce qui est difficilement réalisable (UVED, 2012).

## 2.7 Les outils de l'Analyse du Cycle de Vie

### 2.7.1 Les bases de données

Afin de faciliter l'inventaire du cycle de vie et d'éviter les doublons dans la compilation des données, de nombreuses bases de données ont été développées au cours des dernières décennies (Finnveden. G., 2009). Les bases de données représentent les sources utilisées par les logiciels d'ACV pour calculer les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service. Ce sont des fichiers tableurs dans lesquels sont stockées toutes les informations concernant les données enregistrées lors de leur conception (UVED, 2012).

Des nombreuses bases de données existent actuellement sur le marché. Elles sont structurées selon des critères plus ou moins adéquats et importants. On peut trouver par exemple des classifications par type d'industrie ou par type de produit, ou encore selon des critères comme les fonctionnalités ou l'utilisation (UVED, 2012).

Selon Finnveden. G. (2009), plusieurs bases de données publiques nationales et internationales ont été publiées par le passé, parmi lesquelles la base de données suédoise SPINE@CPM, la base de données allemande PROBAS, la base de données japonaise JEMAI, la base de données américaine NREL, la base de données LCI australienne, la base de données suisse sur l'écologie (Ecoinvent, 2007) et la base européenne de données sur le cycle de vie (ELCD).

Certaines bases de données sont actualisées et mises à jour en continu par des industriels regroupés par branche (automobile, industrie agro-alimentaire, électronique, etc.). Grâce au travail très coûteux de recueil de données et d'évaluation des impacts, l'utilisation de ces bases de données est très souvent payante. Ceci est dommageable car cela restreint pour beaucoup d'utilisateurs l'accès aux données nécessaires pour réaliser des ACV et les amène à faire des hypothèses simplificatrices par lesquelles il est parfois possible d'évaluer l'impact environnemental de certains produits ou services de façon non correcte (UVED, 2012).

La base de données la plus reconnue, leader incontestable sur le plan mondial, est « l'Ecoinvent » (UVED, 2012).

## 2.7.2 Introduction aux logiciels d'ACV : problématique relative à la modélisation

Il est actuellement impensable de réaliser une Analyse du Cycle de Vie sans faire appel aux outils logiciels informatiques.

### 2.7.2.1 Modélisation des données et du cycle de vie

Pour la réalisation d'une Analyse du Cycle de Vie deux situations peuvent être envisagées (UVED, 2012) :

- Le logiciel utilisé dispose d'une base de données grâce à laquelle on peut modéliser l'intégralité des renseignements relatifs au cycle de vie du produit ou du système étudié. Il faut alors juste vérifier que le produit et les situations considérées s'inscrivent bien dans le domaine de validité du logiciel ;
- Le logiciel ne contient pas toutes les données ; il faut alors, dans ce deuxième cas, recueillir les données nécessaires pour modéliser le cycle de vie du produit et de la situation étudiée.

Au vu des problèmes liés aux bases de données, il y a la possibilité d'introduire de nouvelles données dans les logiciels d'ACV. Mais également d'avoir la possibilité de choisir une méthode d'évaluation des impacts adéquate car les résultats dépendent de celle-ci. Pour rappel, si le choix d'une méthode n'est pas fait, on obtiendra juste un inventaire des flux dans la plupart des logiciels d'ACV (UVED, 2012).

### 2.7.2.2 Fonctionnalités et spécificités des logiciels d'ACV

Voici quelques fonctionnalités, avantages et spécificités des logiciels d'ACV, afin d'illustrer les diverses possibilités offertes en termes de modélisation et de calcul des impacts environnementaux essentiels aux produits et process industriels.

Dans le but d'illustrer les possibilités offertes par la totalité des outils existants, une série de logiciels sont couramment utilisée :

1. Les logiciels d'ACV commerciaux avec licence d'utilisation (Eggermont. D., 2009) comme :
  - SimaPRO : logiciel d'ACV créé en 1990 par Pré-Consultants. Il s'agit de l'un des logiciels les plus vendus au monde. Il donne l'accès à 8 bibliothèques de données d'inventaires dont Ecoinvent. Il contient également différentes méthodes

d'évaluation (CML, Recipe, Impact 2002, IPCC 2007, ...) et surtout il permet la comparaison de produits ;

- GaBi : logiciel développé par l'Université de Stuttgart. Il dispose également de plusieurs bases de données et plusieurs méthodes d'évaluation d'impact ;
- Umberto : outil d'analyse utilisant une interface graphique pour réaliser des diagrammes de flux. Il dispose également d'un système d'évaluation des impacts. Bien adapté aux processus industriels ;
- Team : outil développé par PricewaterhouseCoopers. Il permet de décrire des systèmes industriels et d'en calculer les inventaires du cycle de vie associés ainsi que les impacts environnementaux potentiels.

## 2. Les logiciels libres (Eggermont. D., 2009) :

- CMLCA (Chain management by Life Cycle Assessment) : ne dispose pas de base de données ni de méthodes d'évaluation d'impact mais elles peuvent être facilement importées ;
- Open LCA : logiciel open-source et gratuit.

# **PARTIE PRATIQUE**

## Introduction

Carmeuse est une entreprise qui fabrique de la chaux. La mission principale de la société est d'être reconnue comme référence mondiale dans la production de chaux et de calcaire. Carmeuse est active sur six marchés : la sidérurgie, la construction, l'agriculture/l'alimentation, l'environnement, les produits manufacturés et la métallurgie (Carmeuse, 2018).

Grâce à ses caractéristiques chimiques, la chaux est utilisée dans plusieurs domaines et est présente dans notre quotidien. En effet, la chaux est utilisée pour le traitement des sols (corrige la structure ou l'acidité du sol), pour la fabrication du mortier, pour transformer le minerai de fer en fonte brute, pour capturer les gaz polluants, pour corriger la dureté de l'eau ou empêcher la formation de tartre, pour purifier le sucre ou encore pour maximiser la blancheur du papier ainsi que pour la fabrication de savon, etc. (European Lime Association, 2018).

La production de chaux est complexe de par ses nombreuses étapes de fabrication. En effet, la fabrication de la chaux se réalise en 3 étapes (Carmeuse, 2018). Premièrement, au niveau de la carrière, la roche calcaire est extraite. Cette étape comprend la découverte, l'extraction, le forage et le minage (tirs de mines). Deuxièmement vient le travail de la pierre, qui est la « dépendance » d'une carrière, et qui consiste à avoir une bonne granulométrie de pierre calcaire pour pouvoir l'introduire dans les fours. Troisièmement, la calcination de la pierre peut être faite dans les fours afin de produire de la chaux.

Pour cette partie pratique, une Analyse Cycle de Vie de la fabrication de chaux sera réalisée. Suite aux résultats de l'ACV, une comparaison d'ACV sera établie avec une entreprise basée en Suisse ; d'autre part, des améliorations sur le système de management environnemental seront proposées à l'entreprise Carmeuse.

## Chapitre 3 : Contexte

### 3.1 Cas d'étude

L'Analyse Cycle de Vie sera effectuée auprès d'une des carrières que possède l'entreprise Carmeuse. Effectivement, Carmeuse possède plusieurs carrières en Belgique afin de produire de la chaux. Les carrières sont situées à Aisemont (province de Namur), à Wanze (province de Liège), à Couvin (province de Namur) et à Engis (province de Liège).

La carrière choisie pour établir l'ACV est la carrière de Moha, située à Wanze. Le choix de la carrière a été très simple. D'une part, parce que lors de mon stage effectué au sein de la société Carmeuse, il m'a été demandé de recenser les impacts environnementaux de la carrière de Moha. D'autre part, par le fait que la carrière en question est située entre les habitants de la ville de Wanze et des champs d'agriculture (voir figure n°12), ce qui nécessite donc une vigilance accrue de la part de Carmeuse en terme de contrôle des différents impacts environnementaux. De plus, sur le site de Moha, toutes les différentes étapes de production de la chaux sont reprises : de l'extraction de la matière première (roche calcaire) à la production de chaux.



Figure 12 : Carrière de Moha<sup>11</sup>

<sup>11</sup> SOURCE : google maps (2018), Carrière de Moha, <https://www.google.be/maps/search/carrière+de+moha/@50.5445326,5.175354,15826m/data=!3m1!1e3>, consulté le 1/03/2018

## 3.2 Fabrication de chaux

La fabrication de la chaux est divisée en trois grandes parties : la carrière, le traitement de la pierre et le processus de fabrication de chaux.

### 3.2.1 Carrière

La production de chaux commence par l'extraction de calcaire des carrières et des mines. En effet, avant d'avoir la pierre pour produire de la chaux, il faut passer par plusieurs étapes que sont la découverte et l'extraction qui est composée du forage/minage.

#### 3.2.1.1 La découverte

Cette première opération consiste à décaper les terres inexploitablement situées au-dessus des niveaux à exploiter : il s'agit principalement des terres végétales et des roches très altérées ou « stériles de découverte ». Ces niveaux vont être retirés mécaniquement (Nicolás Honorato Cavadas, 2004 ; DGO3, 2010).

#### 3.2.1.2 L'extraction

Cette étape comprend le forage des trous, d'une quinzaine de mètres de profondeur et d'une dizaine de centimètres de diamètre, destinés à recevoir des explosifs (Encem, 2011). Une fois les explosifs introduits dans les trous forés, vient l'étape du minage par explosion (à l'aide des tirs de mines) afin d'extraire la roche calcaire (DGO3, 2010).

Un travail préliminaire d'étude du gisement est nécessaire afin de pouvoir identifier les parties du gisement dans lesquelles la pureté du calcaire est suffisante pour produire de la chaux (DGO3, 2010).

La figure suivante (n°13), présente un récapitulatif des différentes étapes des travaux de la carrière (découverte et l'extraction avec le forage/minage) afin d'extraire la roche calcaire.

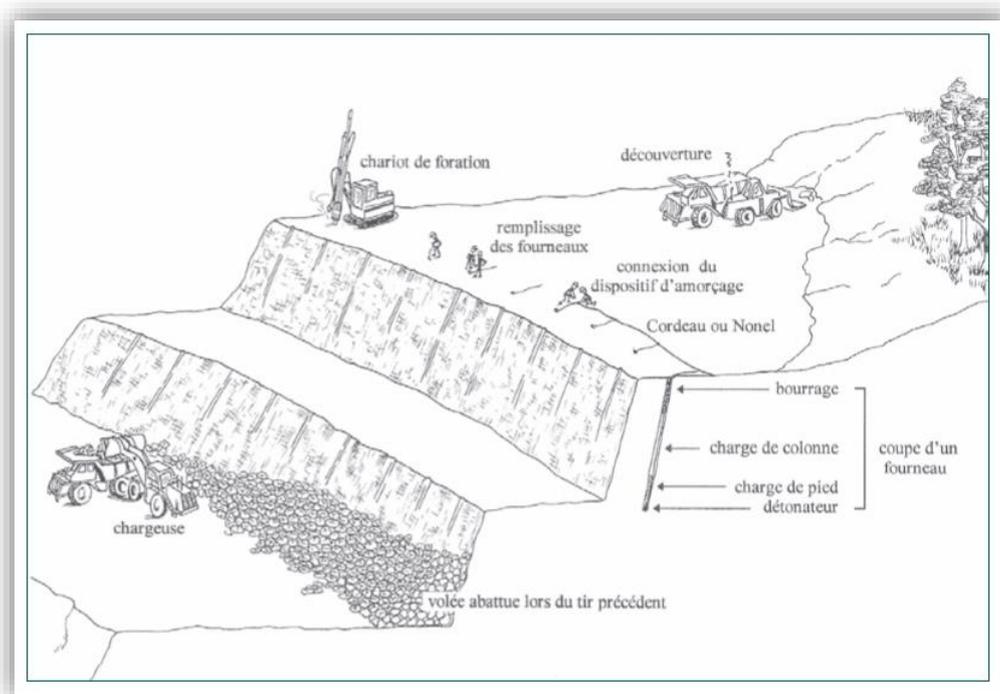


Figure 13: Résumé des différentes étapes de la Carrière<sup>12</sup>

### 3.2.2 Travail de la pierre

Pour le traitement de la pierre, on va retrouver ce qu'on appelle la « dépendance ». La dépendance d'une carrière représente les lignes de traitement de la pierre calcaire.

#### 3.2.2.1 Le concassage ou broyage

Le broyage est une opération essentielle du traitement des roches calcaires extraites afin de produire la chaux. La roche calcaire entre dans un broyeur primaire pour briser la roche. Selon la taille de la pierre d'alimentation requise, le calcaire peut passer par un concasseur secondaire ou tertiaire pour réduire davantage sa taille (DGO3, 2010 ; Union nationale des producteurs de granulats, 2018).

#### 3.2.2.2 Le criblage

Le criblage est l'opération qui permet de sélectionner les fragments de roche et de les séparer en au moins deux sous-ensembles de granulométries différentes, le crible ne laissant passer

<sup>12</sup> Source : DGO3 (2010), *Les carrières en Wallonie : un monde à redécouvrir*, 133.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

dans ses mailles que les éléments inférieurs à une certaine taille (Union nationale des producteurs de granulats, 2018).

#### 3.2.2.3 Le lavage

Le lavage a pour but d'éliminer les fines particules polluantes agglomérées entre elles ou collées à la surface des produits finis mais également d'obtenir des granulats de calcaire « propres » (Union nationale des producteurs de granulats, 2018). L'absence d'impuretés est essentielle pour la production d'une chaux de qualité.

#### 3.2.3 La calcination

La calcination du calcaire se déroule dans des fours. Il existe différentes technologies de fours qui présentent des efficacités énergétiques différentes. Selon la qualité de chaux demandée par le client, le type de four va varier. Pour cuire ou « calciner » du calcaire, il faut qu'il y ait un important transfert de chaleur vers le calcaire. En général, le transfert de chaleur de la source de carburant au calcaire peut être divisé en deux étapes (National Lime Association, 2018) :

- Calcination – dont le processus est de fournir suffisamment de chaleur (à plus de 800°C) pour chauffer le calcaire et provoquer la décarbonatation, et maintenir la température (typiquement entre 1200 et 1300 °C) pendant un temps suffisamment élevé pour obtenir la qualité voulue (réactivité et teneur en CO<sub>2</sub> résiduel). Lorsque le calcaire se déplace dans le four, la chaleur transforme le calcaire en chaux vive (CaO) et en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>).
- Refroidissement - la chaux vive quittant la zone de calcination est refroidie par un contact direct avec "l'air de refroidissement".

Une fois la chaux fabriquée, celle-ci peut être vendue telle quelle (chaux en roche) ou être broyée. Elle peut également être mise en contact pour produire de la chaux hydratée, voire être mise en solution pour obtenir du lait de chaux (National Lime Association, 2018).

### 3.3 Les principaux impacts environnementaux de la fabrication de chaux

Les impacts environnementaux de la fabrication de chaux sont nombreux. Effectivement, il y a les impacts environnementaux de la carrière, du travail de la pierre (dépendance) ainsi que de la fabrication de chaux à proprement dit.

*Les impacts environnementaux principaux de la fabrication de chaux, reprenant la carrière et la production de chaux, sont les suivants :*

#### 3.3.1 Les impacts atmosphériques

Les impacts atmosphériques d'une carrière proviennent de deux sources différentes. La première source est l'empoussièremement de l'air qui est provoqué par le forage des trous de mines pour l'abattage de la roche calcaire, des tirs de mines et de la chute de la roche calcaire abattue (voir figure n°14), de la circulation de la pelleteuse, de la circulation du chariot élévateur, du façonnage des pierres, de la circulation et du chargement vers les camions ou du chargement vers les machines du travail de la pierre... Plus le temps est sec et venteux, plus les poussières (PM10/PM2.5) sont présentes sur le site (DGO3, 2010 ; Horacio.F , 2015).



Figure 14: empoussièremement de l'air dû aux tirs de mines<sup>13</sup>

La seconde source est la combustion de gaz, c'est-à-dire les émissions de gaz d'échappement des moteurs thermiques (engins de chantier comme des dumpers...), les émissions de gaz produits lors des tirs de mines (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, COV...) ainsi que la calcination de la roche calcaire dans les fours (CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, dioxines...) (DGO3, 2010 ; Horacio.F , 2015).

<sup>13</sup> Source : DGO3. (2010). Les carrières en Wallonie : un monde à redécouvrir, 133.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

### 3.3.2 Les impacts énergétiques

L'exploitation d'une carrière demande énormément d'énergie. Il existe deux types d'énergie. D'une part, l'énergie électrique qui est utilisée pour le fonctionnement des bandes transporteuses, pour le pompage des eaux ainsi que les détonateurs électriques pour les tirs de mines. D'autre part, l'énergie fossile qui est utilisée pour le fonctionnement des engins, de machines pour l'ensemble de la carrière mais est aussi utilisée lors de la calcination du granulats de calcaire pour en faire de la chaux (DGO3, 2010 ; Horacio. F., 2015).

L'énergie fossile utilisée pour la carrière est le fuel à bas soufre ce qui provoque des émissions de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>...lors de la combustion. Tandis que le gaz naturel ainsi que le lignite sont utilisés pour alimenter les fours (calcination) (Carmeuse,2018).

### 3.3.3 Les impacts sur l'eau

Il existe plusieurs risques de pollution de l'eau notamment lorsque l'eau de la nappe phréatique est pompée afin de continuer à extraire la roche calcaire. Le risque de pollution de l'eau est dû à l'utilisation d'hydrocarbures pour les engins (DGO3, 2010 ; Horacio. F., 2015). Par exemple, une fuite d'hydrocarbure peut survenir ainsi que le déversement d'huile de moteur lors des entretiens.

La pollution de l'eau peut être également causée lors du lavage de la pierre calcaire. Lors du lavage de la pierre calcaire, l'eau en sortie sera chargée en matière en suspension (MES), en matière sédimentable... ce qui risque d'atteindre le réseau hydrographique et les eaux souterraines. Cependant, avant le rejet de l'eau de lavage dans les eaux de surface, les eaux polluées vont dans un bassin de décantation (voir figure n°15) afin que les MES, les matières sédimentables, décantent (DGO3, 2010 ; Horacio.F , 2015).



Figure 15: bassin de décantation de Moha

### 3.3.4 Les impacts du bruit et des vibrations

Dans une carrière le bruit provient des divers engins (pelleteuse, dumpers...) ; des outillages de travail comme la foreuse et le brise-roche ; des machines utilisées lors du travail de la pierre calcaire comme le concassage, le criblage, le tamisage et les bandes transporteuses ; du charroi (circulation des engins avec déversement de matières) et également des tirs de mines (Horacio. F., 2015).

Pour ce qui est des vibrations, elles proviennent notamment de l'utilisation du brise-roche et de la foreuse mais surtout des tirs de mines. Les ondes vibratoires peuvent être nuisibles aux immeubles et constructions (en fonction de la fréquence et de l'intensité), mais sont également dérangeantes pour les habitants à proximité de la carrière (Gosselin. G., 2008).

Il existe deux types de bruits, les bruits continus qui sont présents tout au long de la journée (charroi, concassage...), ainsi que les bruits non continus comme les tirs de mines, qui sont des bruits ponctuels (DGO3, 2010 ; Horacio. F., 2015).

### 3.3.5 Les impacts environnementaux spécifiques aux carrières

#### 3.3.5.1 L'impact sur le paysage et occupation du sol

Les activités d'extraction entraînent une profonde transformation des paysages concernés dont la consommation de sols (forêts, zones agricoles, espaces verts...), la modification et/ou destruction de paysages... L'impact peut sensiblement varier en tenant compte des facteurs de relief et d'occupation des sols locaux. L'impact d'une carrière marque indéniablement le territoire, et ce pour une durée quasi indéterminée. Notons qu'il peut exister une contradiction entre, d'une part la création de nouveaux paysages qui apporte une plus-value visuelle, mais

qui, d'autre part, va à l'encontre d'un souci de préservation des paysages wallons caractéristiques (DGO3, 2010 ; Horacio. F., 2015).

#### *3.3.5.2 L'impact sur la faune et la flore*

L'exploitation d'une carrière engendre nécessairement des perturbations pour la faune et la flore, d'autant plus importantes que la zone concernée n'est pas occupée par l'homme préalablement à l'activité extractive. La suppression du milieu biologique ne doit pas être perçue comme irréversible et définitive (DGO3, 2010 ; Horacio. F., 2015). En effet, le réaménagement peut contribuer à la valorisation d'un milieu ou d'un paysage (par exemple, ouverture d'une carrière dans une zone agricole et réaménagement en zone humide ou encore les hirondelles de rivages qui s'installent volontiers dans les parois sablonneuses de certaines carrières (voir figure n°16).



*Figure 16: hirondelles de rivages<sup>14</sup>*

---

<sup>14</sup> Source : DGO3 (2010). Les carrières en Wallonie : un monde à redécouvrir, 133.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

### 3.3.5.3 La génération de déchets

Les terres de découverte et stériles d'exploitation constituent un « déchet » particulier, considéré comme « valorisable ». La quantité de telles matières est variable selon le site d'extraction. La plupart du temps, ces matières sont remodelées sur le site ou remises en place dans le fond de la fosse après extraction. Certains matériaux peuvent être valorisés, comme des argiles destinées aux cimenteries ou aux briqueteries (Horacio. F., 2015).

Les autres différents types de déchets susceptibles d'être générés au sein de la carrière sont (Horacio. F., 2015) :

- Les déchets industriels spéciaux (DIS) : chiffons huileux, filtres à huile, ampoules, tubes lumineux, boues de déshuileur, aérosols, batteries ;
- Les huiles usagées ;
- Les déchets industriels banals (DIB) : déchets d'emballage (fûts en métal, palettes en bois...), les déchets ménagers, ferrailles, encombrants...

## Chapitre 4 : L'Analyse Cycle de Vie

### 4.1 Définition des objectifs

L'objectif de l'Analyse Cycle de Vie (ACV) est de quantifier les impacts environnementaux de la fabrication de chaux, depuis l'extraction de la matière première dans la Carrière de Moha jusqu'à sa production, afin d'apercevoir les problèmes éventuels et de proposer des recommandations pour limiter les impacts et améliorer la performance. En effet, face aux multiples impacts environnementaux passant de la carrière jusqu'à la fabrication de chaux (atmosphérique, énergétique, l'eau...), l'ACV sera utile pour compléter la déclaration environnementale, c'est-à-dire le système de management environnemental (ISO 14001), de la société. De plus, une comparaison d'Analyse Cycle de Vie de la chaux sera effectuée avec une étude réalisée sur une entreprise basée en Suisse.

#### 4.1.1 Unité fonctionnelle

L'activité principale de Carmeuse est la fabrication de chaux vendue sous plusieurs formes dont la chaux vive, la chaux hydratée (chaux éteinte), le lait de chaux ou encore la chaux dolomique. Le produit retenu pour l'évaluation de l'impact sur l'environnement est la chaux vive (CaO).

L'Analyse cycle de vie sera divisée en trois parties. La première partie traitera de l'ACV de la carrière de Moha, reprenant les étapes de la découverte, l'extraction ainsi que le minage. La masse extraite de pierre calcaire de 1 tonne a été choisie comme unité fonctionnelle.

Ensuite, l'analyse cycle de vie de la partie dépendance de la carrière sera traitée. Les étapes reprises dans cette section sont le broyage, le criblage et le lavage de la pierre calcaire. L'unité fonctionnelle choisie est 1 tonne de granulats de calcaire.

La dernière partie sera consacrée à la production de chaux vive et l'unité fonctionnelle retenue est 1 tonne de chaux vive produit.

Pour terminer, les trois parties seront assemblées pour obtenir une Analyse Cycle de Vie de l'extraction de la roche calcaire jusqu'à la production de chaux vive. Ce qui permettra ainsi de constater quels sont les impacts environnementaux les plus importants pour produire 1 tonne de chaux vive.

#### 4.1.2 Frontière du système

Le stade de production de chaux vive, allant du berceau à la porte (Cradle To Gate) a été choisi comme frontière du cycle de vie de la chaux (figure n° 17). En effet, l'Analyse Cycle de Vie s'arrête au moment où la chaux vive est vendue aux fournisseurs.

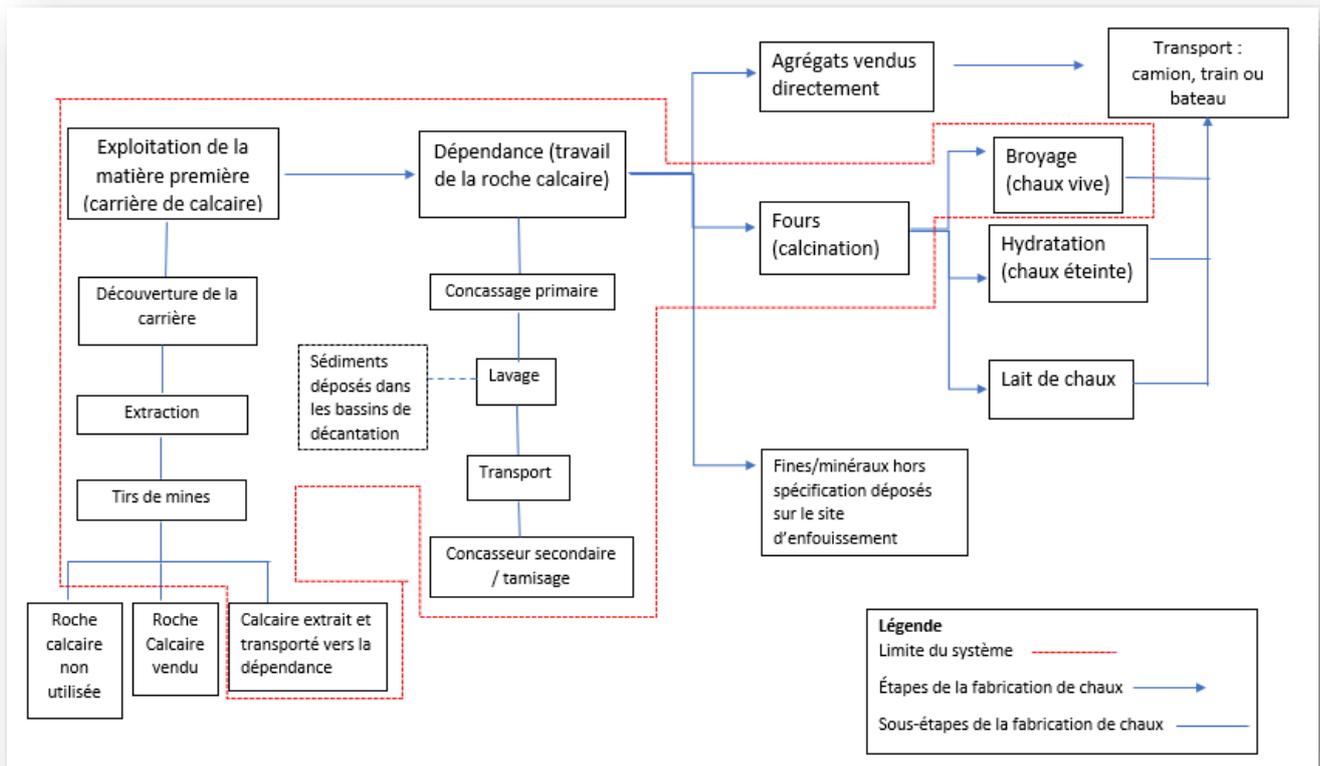


Figure 17: Flow-Sheets général de la production de chaux

D'après le *flow-sheet* ci-dessus, le système étudié est donc l'extraction de la matière première, le travail de la pierre et la production de chaux vive. Sont exclus du système, la production de chaux hydratée (chaux éteinte), le lait de chaux ainsi que les produits « semi-finis » vendus comme la roche calcaire et les agrégats de calcaire.

De plus, ne sont pas pris en compte dans l'Analyse Cycle de Vie, par manque de données récoltées, le traitement des déchets produits lors des différentes étapes ainsi que la maintenance des différents engins (pelleteuse, dumpers...).

#### 4.1.3 Systèmes des produits et processus élémentaires

Selon la limite du système délimité précédemment, les flux élémentaires et principaux de la production de chaux étudiés sont les suivants :

##### 4.1.3.1 Les flux énergétiques entrants

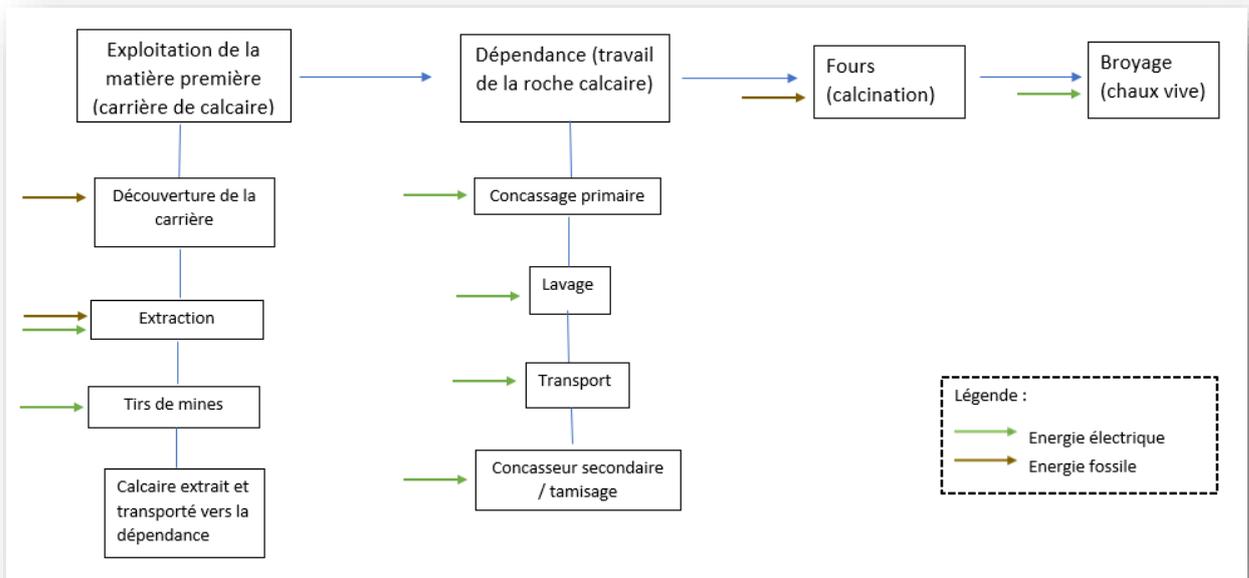


Figure 18: flux énergétiques entrants dans le système

Il existe deux types d'énergie utilisée pour produire de la chaux. D'abord, l'énergie électrique qui est utilisée pour l'extraction lors du pompage des eaux mais également pour la détonation électrique afin d'effectuer des tirs de mines. L'énergie électrique (flèche verte sur la figure n°18) est utilisée également pour le fonctionnement de toutes les machines (concasseurs, lavage, bandes transporteuses) présentes lors du travail de la roche calcaire et lors du broyage de chaux vive.

Ensuite, l'énergie fossile (flèche brune sur la figure n°18) est utilisée pour plusieurs fonctions. Tout d'abord pour alimenter les engins présents dans la carrière comme les pelleteuses, les dumpers... sous forme de fuel. Ensuite, pour alimenter les différents fours afin de produire de la chaux sous forme de lignite ou encore de gaz naturel dans le cas du site de Moha.

#### 4.1.3.2 Les flux atmosphériques sortants

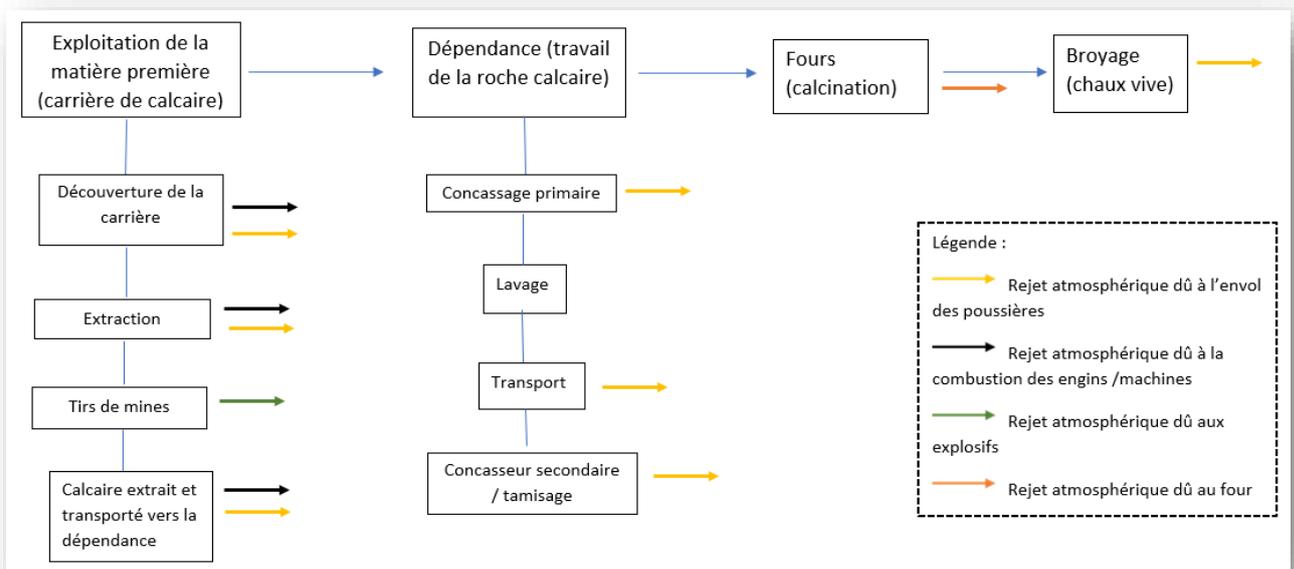


Figure 19: flux atmosphériques sortants du système

En ce qui concerne les rejets atmosphériques, il en existe quatre types. Premièrement, les rejets atmosphériques provoqués par l'envol des poussières (flèche jaune sur la figure n°19), qui sont présents tout au long des étapes de production de chaux. En effet, le charroi (circulation des engins) ainsi que les déversements de roche calcaire vers les machines (concassage...) provoquent des envols de poussières. Ce rejet atmosphérique est l'un des plus visibles et des plus conséquents de tout le site.

Deuxièmement, il y a les rejets atmosphériques dus à la combustion de carburant des engins comme les dumpers, les pelleteuses, la foreuse et le brise-roche. Ces rejets sont composés de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, de particules fines...et sont présents au niveau de l'extraction de la matière première.

Troisièmement, les rejets atmosphériques propulsés lors de l'explosion (tirs de mines) de la roche calcaire. Ces rejets sont principalement composés de poussières (PM10 et PM2,5).

Enfin, la combustion de lignite ou de gaz naturel pour calciner les granulats de calcaire provoque également des rejets atmosphériques. Ces rejets sont principalement les suivants : CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, HF, dioxines, furanes...

#### 4.1.3.3 Les flux entrants et sortants de l'eau

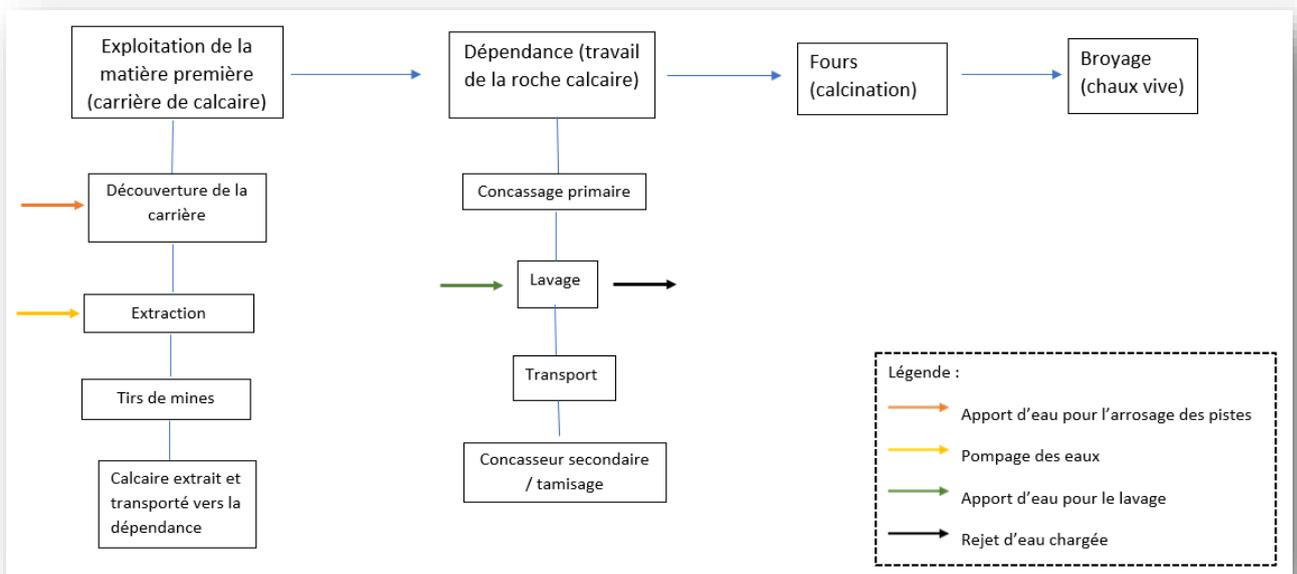


Figure 20: flux entrants et sortants de l'eau

En ce qui concerne l'eau, les entrants dans le système étudié sont de trois types. En premier lieu, l'apport d'eau est nécessaire au niveau de l'extraction de la matière première afin d'arroser les pistes de circulation lorsque le temps est venteux et/ou sec. En effet, s'il n'y a pas d'arrosage de piste lorsqu'il fait chaud et/ou lorsqu'il y a beaucoup de vent, il y aura beaucoup plus d'envol de poussières.

Ensuite, lors de l'étape d'extraction, les eaux de la nappe phréatique ainsi que les eaux souterraines doivent être pompées afin de pouvoir continuer l'extraction de la pierre calcaire pour produire de la chaux.

Finalement, lors du travail de la pierre calcaire, un apport d'eau est nécessaire pour laver le granulat de calcaire produit afin que celui-ci soit propre pour être par la suite envoyé vers les fours.

Pour terminer, les eaux sortantes du système étudié se trouvent au niveau du lavage du granulat de calcaire. Les eaux sortantes de cette étape sont chargées en matière en suspension (MES), en matière sédimentable (MS)... Ces eaux sont ensuite déversées vers les bassins de décantation avant d'être rejetées dans les eaux de surface.

#### 4.1.4 Méthodologie d'évaluation

La méthode d'analyse cycle de vie attributionnelle (cf. chapitre 2.1.4), qui est la méthode classique d'ACV, a été utilisée pour mesurer et quantifier les impacts environnementaux de la production de chaux. En effet, l'analyse cycle de vie attributionnelle permet de se focaliser sur les impacts environnementaux du produit étudié (au niveau du processus de fabrication de chaux).

Le logiciel choisi afin d'évaluer et de quantifier les impacts environnementaux de la fabrication de chaux passant par l'extraction de la matière première (roche calcaire), est le logiciel SIMAPRO (cf. méthodologie). La base de données sélectionnée sous SIMAPRO pour réaliser les ACV est « Ecoinvent » et la méthode retenue pour évaluer les impacts des ACV est « midpoint » (cf. chapitre 2.3.1).

#### 4.1.5 Limitations ou coupure du système

Afin de simplifier les calculs pour quantifier les impacts environnementaux et ainsi faciliter la mise en pratique de l'analyse cycle de vie, certains entrants et sortants ont été exclus du système.

Au niveau de l'extraction de la matière première, sont exclus les déchets générés de par cette première étape (huiles de maintenance, pneus des engins...), le traitement de ces déchets, la maintenance des machines et des engins, le transport ainsi que la roche calcaire vendue en sortie de la carrière.

En ce qui concerne la dépendance de la carrière (travail de la pierre), la maintenance des machines (broyeur, cribleur, bandes transporteuses...), les déchets générés, le traitement de ces déchets ainsi que les agrégats de calcaire vendus n'ont pas été pris en compte lors de l'Analyse Cycle de Vie.

Au niveau de la production de chaux, sont exclus du système, la production de chaux hydratée (chaux éteinte), le lait de chaux ainsi que la chaux dolomique. De plus, les additifs supplémentaires ajoutés lors de la calcination des granulats de calcaire et leurs rejets atmosphériques ne sont pas pris en compte.

Bien que l'ACV soit un outil largement répandu, l'ACV de la production de chaux est limitée. En effet, la seule étude similaire d'Analyse Cycle de Vie portant sur la production de chaux répertoriée sur le logiciel SIMAPRO est celle d'une usine basée en Suisse, la société KalkFabric Nestal.

#### 4.1.6 Qualité des données récoltées

Afin de construire l'Analyse Cycle de Vie, les données nécessaires à l'alimentation de l'inventaire du cycle de vie ont été fournies par la société Carmeuse. Pour traiter ces données sur le logiciel SIMAPRO, c'est la base de données Ecoinvent qui a été exploitée car cette *database* est très réputée (quantitativement et qualitativement). De plus, Ecoinvent est le leader international au niveau des bases de données, elle comprend 2.500 usagers dans plus de 40 pays (ESU-services, 2018).

### 4.2 Réalisation de l'inventaire du cycle de vie (ICV)

L'inventaire des flux de matière et d'énergie est utilisé pour développer le bilan massique du processus de production. L'objectif principal du bilan massique est de déterminer les consommations spécifiques de la matière première du procédé pour produire 1 tonne de chaux vive (CaO).

Dans ce cas, la production de 1 t de CaO nécessite l'extraction de 3,15 t de calcaire de la carrière à transporter vers les installations de production. Une fois que le calcaire arrive à l'usine, il est acheminé au stade de concassage et de criblage, où 1,8 t sont redirigés vers le four et les 1,35 t restantes sont classées comme matériaux de construction car ils ne répondent pas aux exigences dimensionnelles du four (Carmeuse, 2018).

Les tableaux 1, 2 et 3 (voir ci-dessous) montrent les données récoltées par la société Carmeuse, afin de construire les Analyses Cycle de Vie. Le tableau 1, indique les entrants (input) et les sortants (output) pour l'extraction de la matière première (la carrière). Le tableau 2 représente les inputs et les outputs du travail de la pierre (dépendance) et enfin le tableau 3 montre les inputs et les outputs de la production de chaux (calcination).

Tableau 1: INPUTS ET OUTPUTS- ACV CARRIERE

INPUT					
Etape de production	Sous-étape	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
Exploitation de la matière première	Découverte	Eau	Consommation d'eau pour arrosage des pistes	m <sup>3</sup> /an	27.000
	Extraction/ minage	Energie	Fuel (foreuse, dumpers et brise-roche)	litre/an	867.924
			Electricité (pompage des eaux)	Kwh	4.468.433
		Eau	Pompage des eaux	m <sup>3</sup> /an	1.606.970
		Explosif	Explosif pour le tir de mines	Tonne	321
OUTPUT					
Etape de production	Sous-étape	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
Exploitation de la matière première	Sortie de la découverte et extraction/minage	Air	NOX (carburant)	Kg	41,8
			SOX (carburant)	Kg	0,08
			CO2 (carburant)	Kg	2.660
			PM (carburant)	Kg	4,6
		Roche calcaire	CaCO3 (roche calcaire extraite)	Tonne	2.525.499,459

Tableau 2: INPUTS ET OUTPUTS-ACV TRAVAIL DE LA PIERRE

INPUTS					
Etape de production	Sous-étape	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
Travail de la pierre	Ligne pierre	Energie	Electricité	Kwh	6.765.433
			Fuel (chargement expédition pierre)	Litre	127.405
		Roche calcaire	CaCO3 (extrait de la carrière)	tonne/an	1.864.305
OUTPUTS					
Etape de production	Sous-étape	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
Travail de la pierre	Ligne pierre	Air	Quantité de poussières (PM10)	Kg	16.386
		Eau	Matière en suspension (MES)	Kg	35,13779608

Tableau 3: INPUTS ET OUTPUTS-ACV PRODUCTION DE CHAUX

INPUTS					
Etape de production	Sous-étape	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
Production de chaux	Fours (calcination)	Energie	Lignite (four 2)	Tonne	2.908
			Quantité de gaz naturel (four 1+2)	GJ	653.759
	Broyage (chaux vive)	Energie	Electricité	kwh	1.318.368
			Fuel (chargement de la chaux)	litre	1.095
OUTPUTS					
Etape de production	Sous-étape	Type de flux	Catégorie de flux	Unité	Quantité
Production de chaux	FOUR	Air	CaO (sortant des fours)	Tonne	187.001
			CO2 total	T CO2 éq	189.758
			SO2	mg/Nm <sup>3</sup>	3
			NOX	mg/Nm <sup>3</sup>	47,7
			Quantité de poussière totale	mg/Nm <sup>3</sup>	4,7
			PM 10	mg/Nm <sup>3</sup>	0,5

### 4.3 Evaluation de l'Analyse Cycle de Vie

L'Analyse Cycle de Vie de 1 tonne de chaux vive (CaO), sera donc divisée en trois parties : l'ACV de la carrière, l'ACV du travail de la pierre ainsi que l'ACV de la production de chaux. Pour chaque Analyse de Cycle de Vie, un *flow-sheet* reprenant la catégorie d'impact *global warming* ainsi qu'un diagramme représentant toutes les catégories d'impacts environnementaux seront interprétés. La catégorie d'impact *global warming* ou changement climatique est celle qui a le plus d'impact environnemental causé par la production de chaux.

#### 4.3.1 Analyse Cycle de Vie de la carrière

Suite au recensement des données (cf : tableau 1) et à l'introduction de celles-ci dans le logiciel SIMAPRO, l'analyse du logiciel donne tout d'abord un *flow-sheet* (figure n°21) qui représente la répartition des différents flux selon les données encodées, en rapport à la carrière. D'après ce *flow-sheet*, reprenant la catégorie d'impact *global warming*, l'électricité est le flux le plus impactant au niveau de la carrière avec 76.4 % de CO<sub>2</sub> équivalent<sup>15</sup> émis. Le deuxième flux est représenté par le fuel avec 23.5 % de CO<sub>2</sub> équivalent.

---

<sup>15</sup> CO<sub>2</sub> équivalent : équivalent CO<sub>2</sub> désigne le potentiel de réchauffement global (PRG) d'un gaz à effet de serre (GES). Source : Wikipédia (2018), Equivalent CO<sub>2</sub>, [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quivalent\\_CO2](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quivalent_CO2) consulté le 21/05/2018

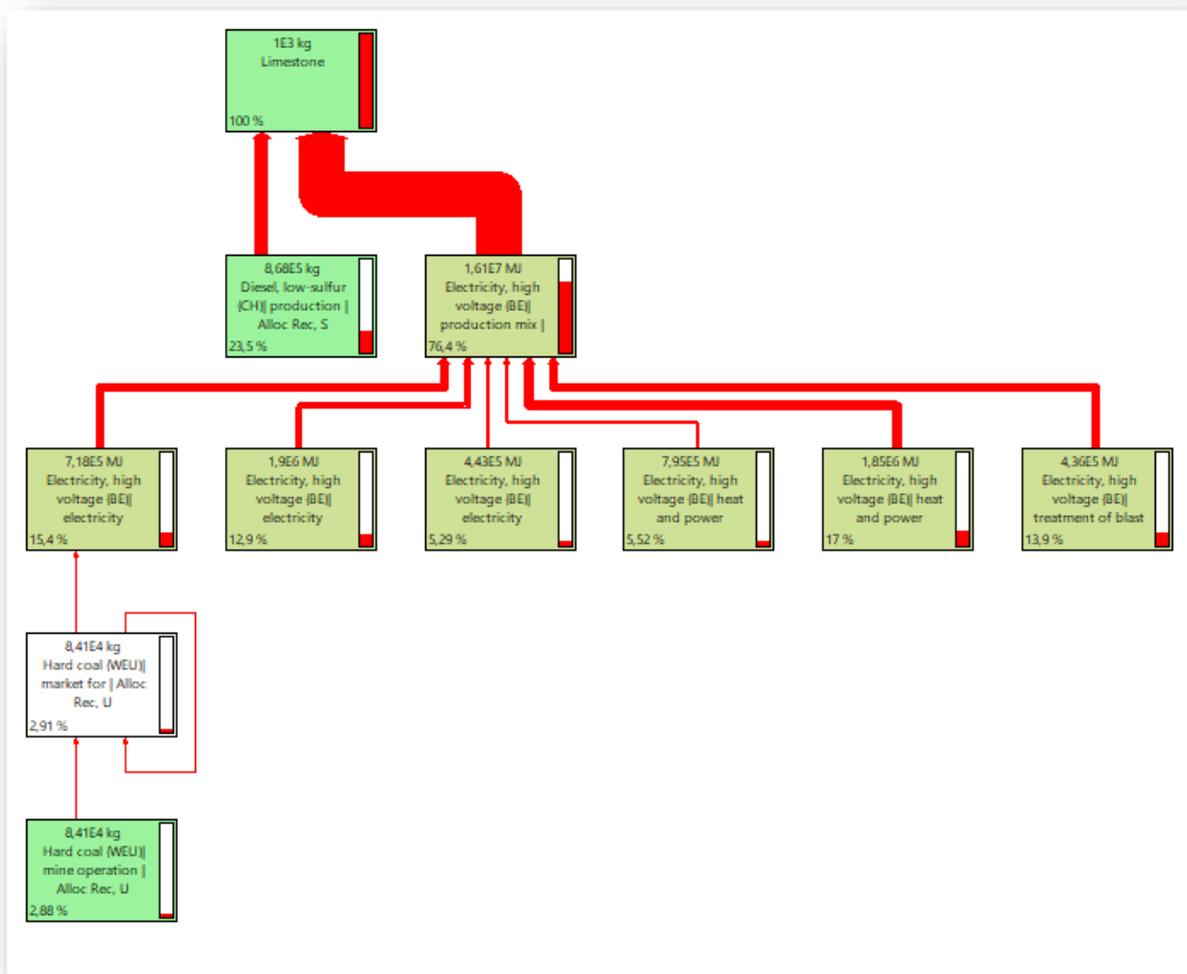


Figure 21: Flow-sheet (catégorie d'impact Global Warming) - ACV carrière

D'après le diagramme suivant (figure n°22) reprenant toutes les catégories d'impacts environnementaux, l'électricité utilisée pour le pompage des eaux d'exhaure<sup>16</sup> est la cause principale, avec 63.23 %, des impacts environnementaux (couleur jaune). Le fuel utilisé pour alimenter les engins et les machines de la carrière est la deuxième cause des impacts environnementaux avec 26,97 % (couleur vert clair). La troisième cause est la consommation de la matière première (roche calcaire) avec 9.57 % (couleur vert foncé). Pour terminer, la quatrième cause est l'utilisation d'explosifs lors des tirs de mines avec 0.23 % (couleur orange).

<sup>16</sup> Eaux exhaure : La gestion de l'eau pendant la période d'exploitation d'un ouvrage souterrain est appelée l'exhaure. Source : Ingénierie et Conseil en Environnement et Aménagement (2018), <https://www.icea-web.com/prestations/constructions-aménagements-et-infrastructures/gestion-des-eaux-d-exhaure-en-nappe-et-protection-des-structures-enterrées/> consulté le 15/05/2018

Selon les résultats de l'Analyse Cycle de Vie de la carrière (voir tableau n°7 en annexe 1), les trois catégories d'impacts les plus touchées sont :

- la toxicité humaine non cancérogène, dont l'électricité est la cause pour 69.64 %, le fuel pour 30.02 % et 0.34 % pour les explosifs ;
- la consommation de l'eau, dont 99.2 % de roche calcaire, 0.67 % d'électricité, 0.31 % de fuel et 0.0009 % d'explosif ;
- le changement climatique, dont l'électricité est la cause pour 76.41 %, le fuel pour 23.45 %, les explosifs pour 0.12 % et la roche calcaire pour 0.02 %.

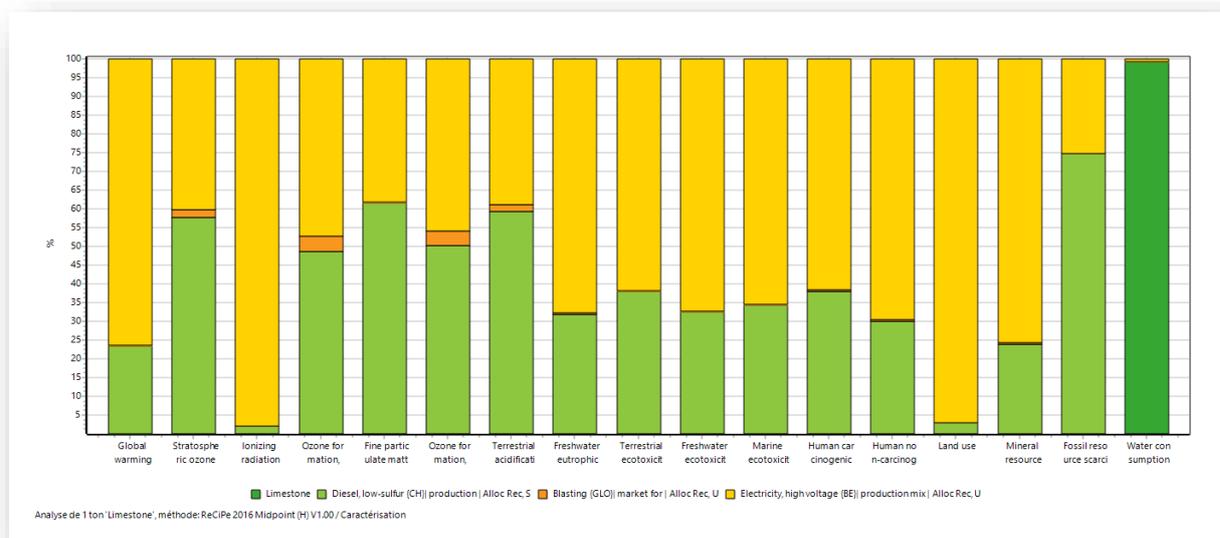


Figure 22: diagramme-ACV carrière

#### 4.3.2 Analyse Cycle de Vie du travail de la pierre

Suite au recensement des données (cf : tableau 2) et à l'introduction de celles-ci dans le logiciel SIMAPRO, l'analyse du logiciel donne tout d'abord un *flow-sheet* (figure n°23) qui représente la répartition des différents flux par rapport au travail de la pierre (dépendance de la carrière). D'après ce *flow-sheet* (catégorie d'impact *global warming*), l'électricité représente le flux le plus impactant au niveau du travail de la pierre avec 97 % de CO<sub>2</sub> équivalent émis.

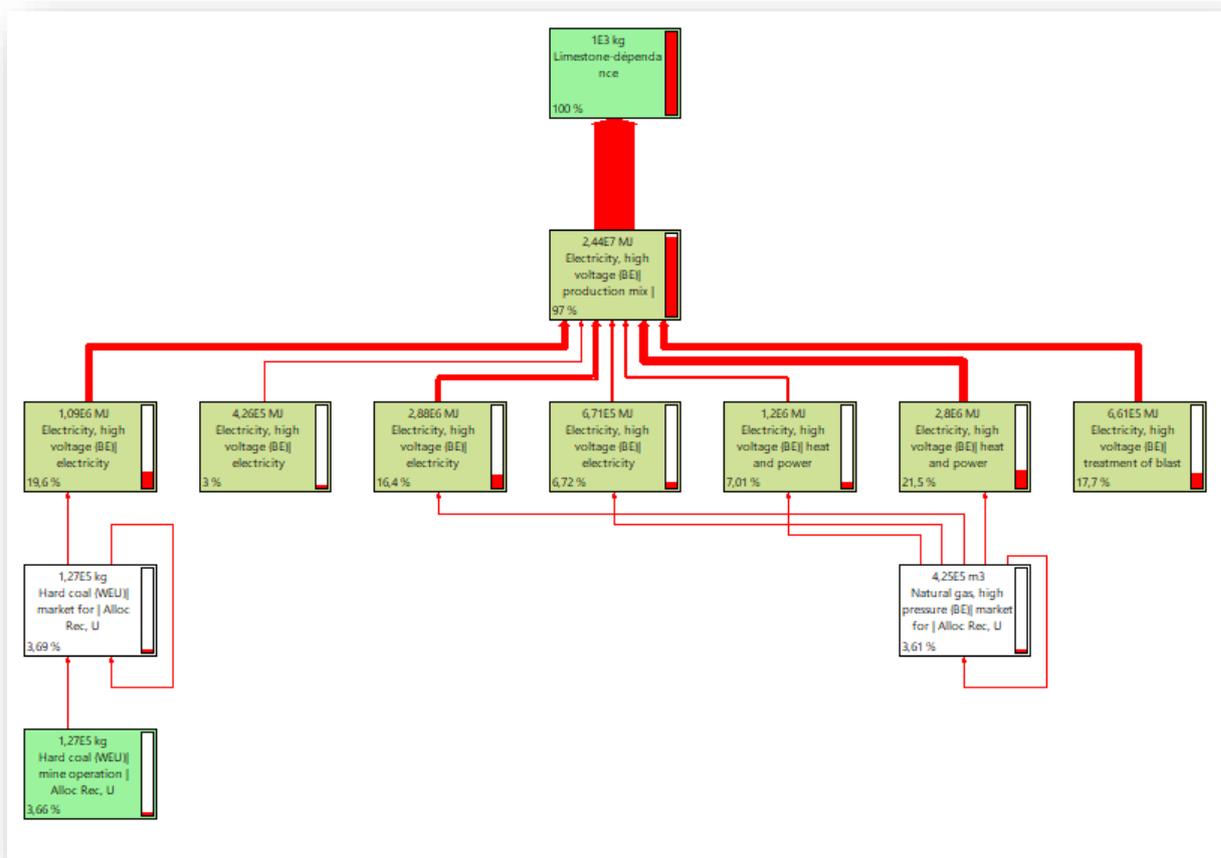


Figure 23: Flow-sheet - ACV travail de la pierre

D'après le diagramme suivant (figure n°24), l'électricité utilisée pour alimenter le broyage, les bandes transporteuses, le lavage et le criblage de la roche calcaire sont effectivement la cause principale des impacts environnementaux (couleur orange). La deuxième cause est l'extraction de la roche calcaire (couleur vert foncé). Pour terminer, la troisième cause est le fuel utilisé pour le transport et chargement vers la ligne pierre (couleur vert clair).

Selon les résultats de l'analyse cycle de vie de la carrière (voir tableau n°8 en annexe 2), les trois catégories d'impacts les plus touchées sont :

- la pénurie de ressources minérales, dont la roche calcaire est la cause pour 99.99 %, l'électricité pour 0.008 % et le fuel pour 0.0002 % ;
- la toxicité humaine non cancérogène, dont l'électricité est la cause pour 95.76 % et le fuel pour 4.24 % ;
- le rayonnement ionisant, dont l'électricité est la cause pour 99.77 % et le fuel pour 0.23 % .

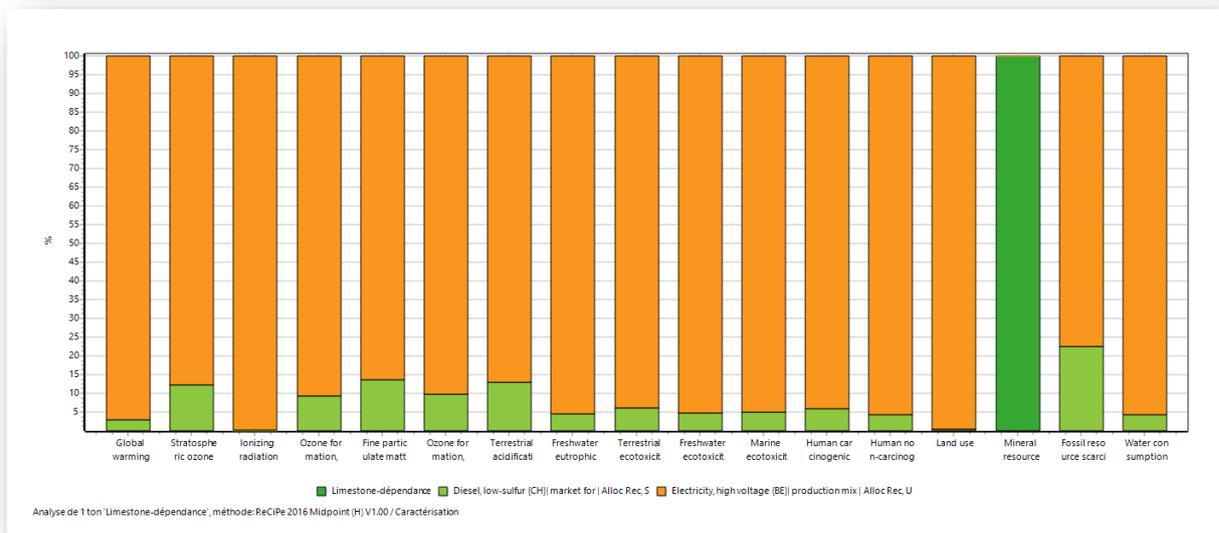


Figure 24: diagramme - ACV travail de la pierre

### 4.3.3 Analyse Cycle de Vie de la production de chaux

Suite au recensement des données (cf : tableau 3) et à l'introduction de celles-ci dans le logiciel SIMAPRO, l'analyse du logiciel donne tout d'abord un *flow-sheet* (figure n°25) qui représente la répartition des différents flux par rapport à la production de chaux. Concernant la catégorie d'impact *global warming*, le flux le plus impactant est la réaction de production de chaux avec 79.2 % de CO<sub>2</sub> équivalent émis (voir tableau n°9 annexe 3). Selon le *Flow-sheet*, le gaz naturel utilisé pour alimenter les fours représente 20.6 % de CO<sub>2</sub> équivalent émis et l'électricité utilisée pour le broyage de la chaux est 0.14 % de CO<sub>2</sub> équivalent émis.

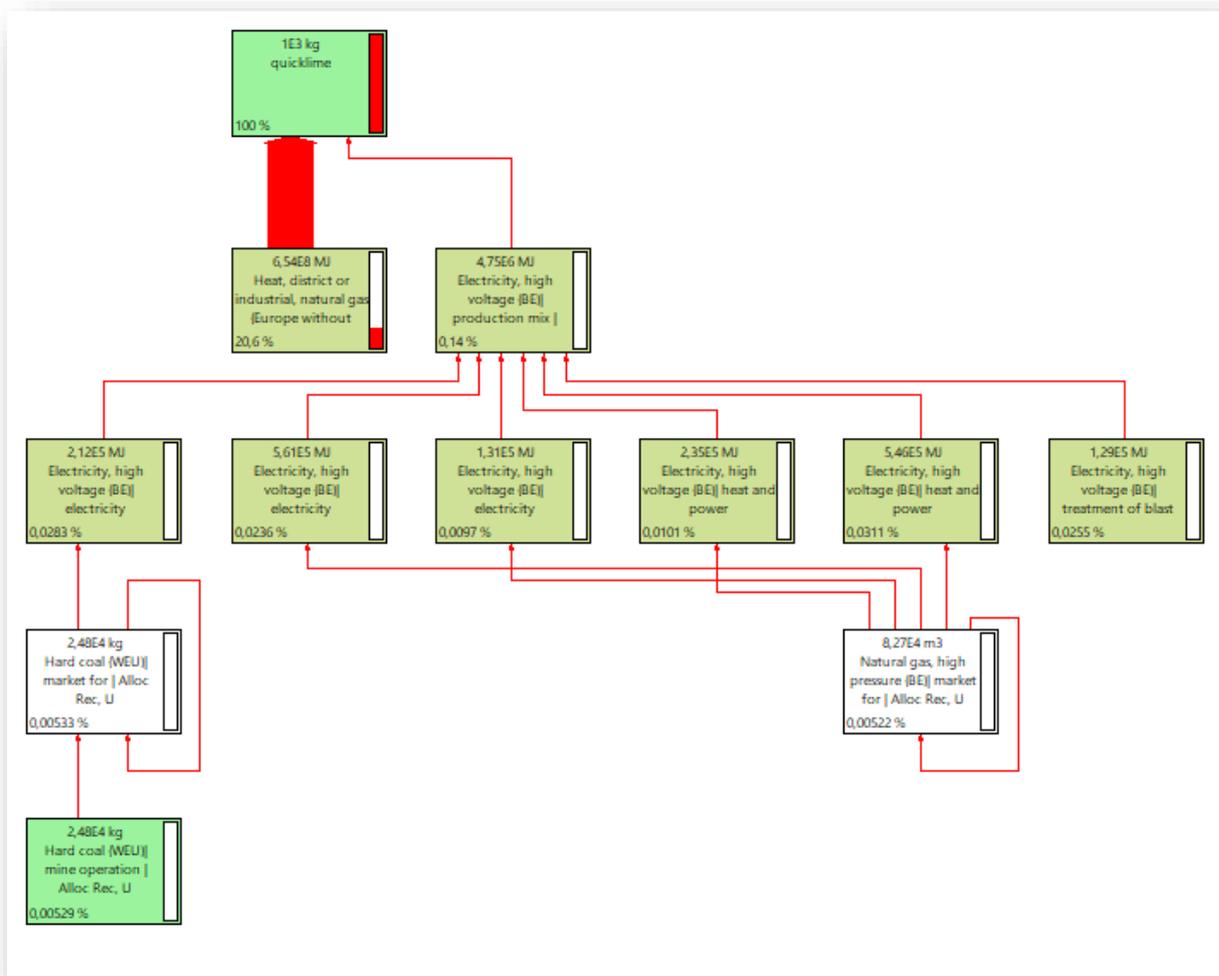


Figure 25: Flow-sheet - ACV production de chaux

D'après le diagramme suivant (figure n°26), la réaction de production de chaux vive (CaO) est la cause principale avec 53.47 % des impacts environnementaux (couleur vert foncé). La deuxième cause est l'utilisation du gaz naturel avec 45.6 % des impacts environnementaux (couleur vert clair). La troisième cause est l'utilisation de l'électricité avec 0.87 % des impacts environnementaux (couleur bleu foncé). La quatrième cause est l'utilisation du lignite pour également alimenter les fours avec 0.06 % (couleur orange). Pour terminer, la cinquième cause est l'utilisation de fuel 0.002 % (couleur jaune).

Selon les résultats de l'Analyse Cycle de Vie de la production de chaux (voir tableau n°9 en annexe 3), les trois catégories d'impacts les plus touchées sont :

- le changement climatique, dont la chaux est la cause pour 79.2 %, le gaz naturel pour 20.6 %, l'électricité pour 0.14 %, le lignite pour 0.002 % et le fuel pour 0.0002 % ;
- la toxicité humaine non cancérigène, dont le gaz naturel est la cause pour 97.6 %, l'électricité pour 2.2 %, le lignite pour 0.2 % et le fuel pour  $4.3 \times 10^{-7}$  % ;
- la pénurie de ressources fossiles, dont le gaz naturel est la cause pour 99.5 %, l'électricité pour 0.5 %, le fuel pour 0.006 et le lignite pour 0.005 %.

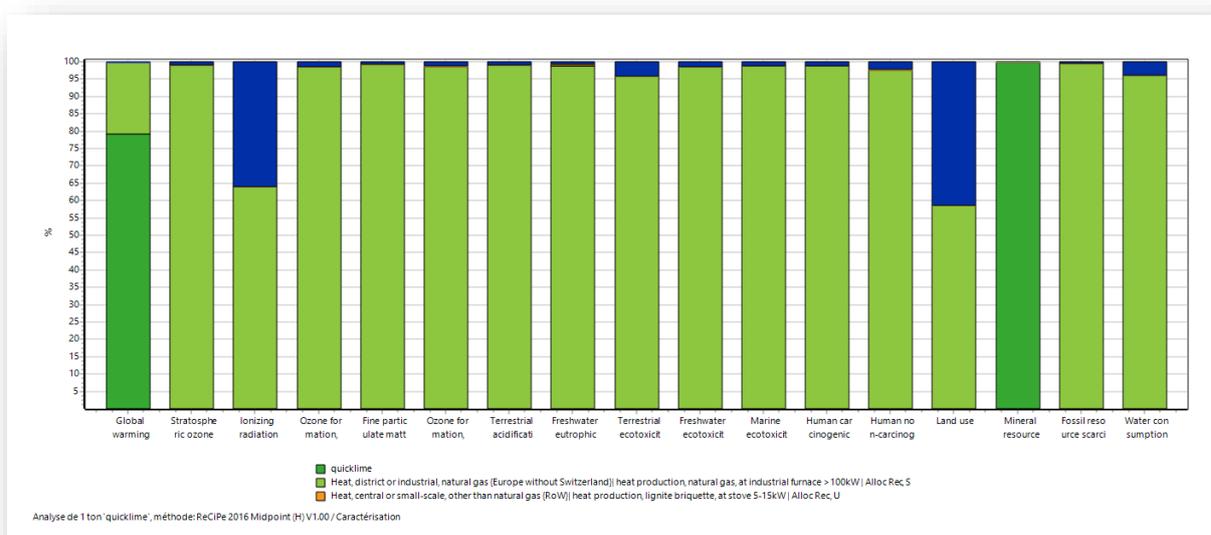


Figure 26: Diagramme - ACV production de chaux

#### 4.3.4 Assemblage des Analyses Cycle de Vie

Suite à l'assemblage des trois Analyses Cycle de Vie (carrière, dépendance et production de chaux) dans le logiciel SIMAPRO, l'analyse donne tout d'abord un *flow-sheet* (figure n°27) qui représente la répartition des différents flux. D'après ce *flow-sheet* (catégorie d'impact *global warming*), la production de chaux représente le flux le plus impactant au niveau de la fabrication de chaux avec 96.8 % de CO<sub>2</sub> équivalent émis suivi de la carrière avec 1.9 % de CO<sub>2</sub> équivalent et de la dépendance avec 1.29 % de CO<sub>2</sub> équivalent.

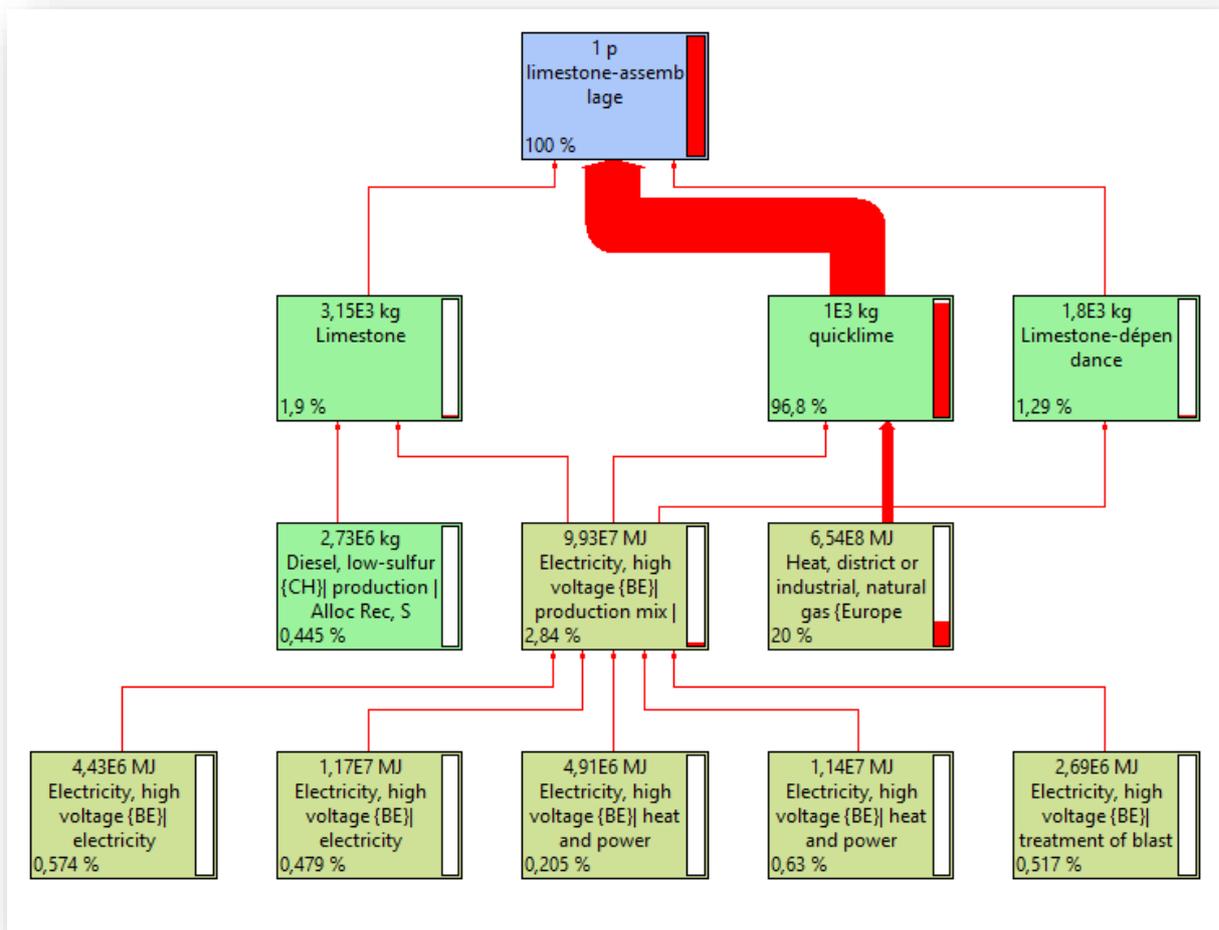


Figure 27: Flow-sheet ACV assemblage

D'après le diagramme suivant (figure n°28), l'étape de production de chaux vive est responsable de 70.7 % des impacts environnementaux (couleur vert clair). Le travail de la pierre contribue à 19 % des impacts environnementaux (couleur orange). Pour terminer, la carrière, quant à elle, participe à 10.3 % des impacts environnementaux (couleur vert foncé).

Selon les résultats de l'analyse cycle de vie de la fabrication de chaux (voir tableau n°10 en annexe 4), les trois catégories d'impacts les plus touchées sont :

- le changement climatique, dont la production de chaux est la cause pour 96.8 %, la carrière pour 1.9 % et la dépendance pour 1.3 % ;
- la toxicité humaine non cancérogène, dont la production de chaux est la cause pour 64.5 %, la carrière pour 21.8 % et la dépendance pour 13.7 % ;
- la pénurie de ressources minérales, dont la dépendance est la cause pour 90.8 %, 9.1 % de la production de chaux et de 0.01 % pour la carrière.

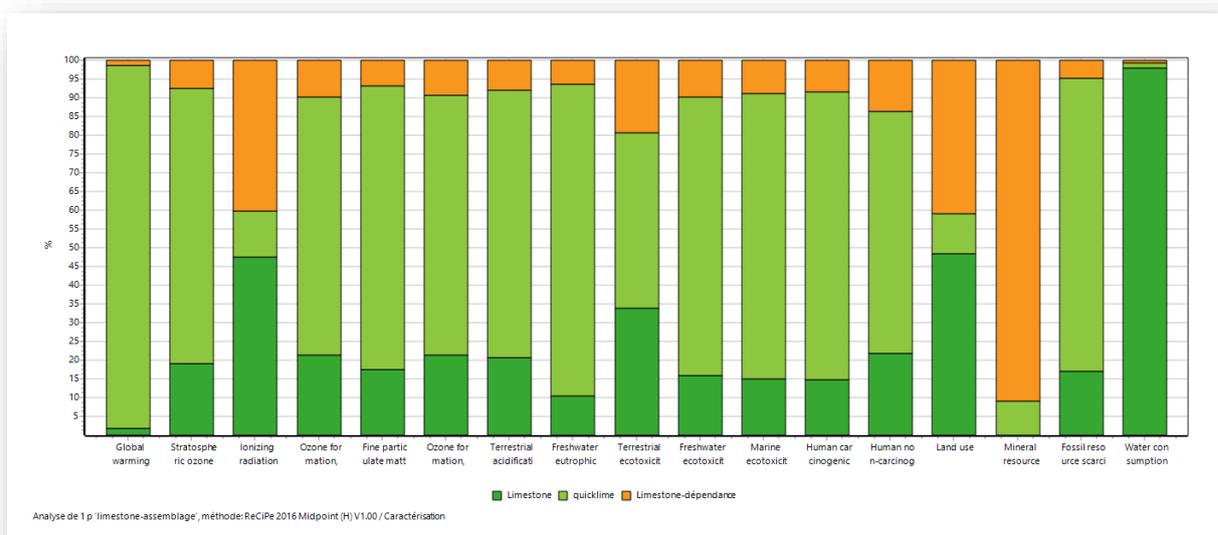
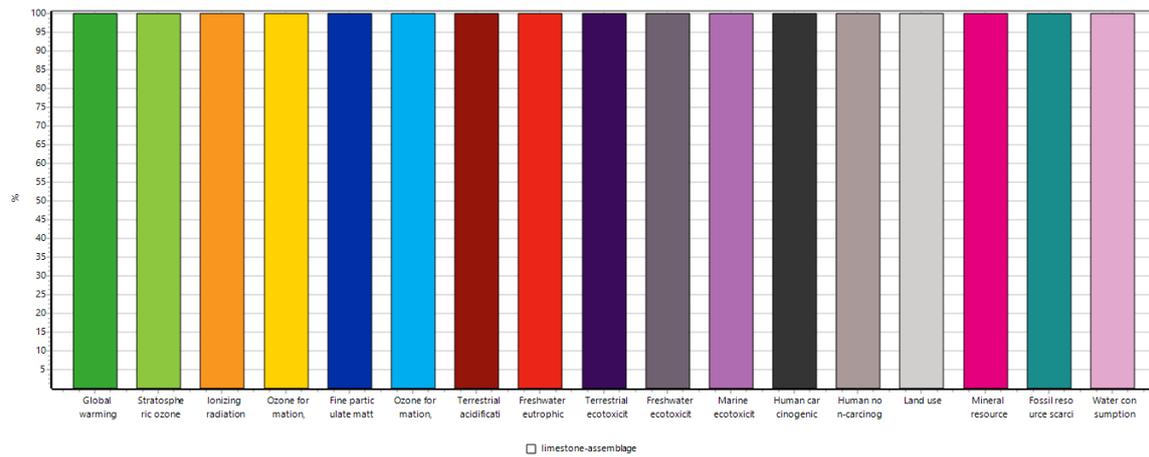


Figure 28: Diagramme - ACV assemblage

#### 4.3.5 Analyse Cycle de Vie générale

En conclusion, grâce au diagramme (figure n°29) suivant et au tableau n°11 (voir annexe 5), les trois impacts environnementaux les plus concernés pour la fabrication d'une tonne de chaux sont : le changement climatique avec 47.6 %, la toxicité humaine non cancérogène avec 30.05 % et la pénurie de ressources minérales avec 14.35 %.



Analyse de 1 p 'cycle de vie lime', méthode: ReCI Pe 2016 Midpoint (H) V1.00 / Caractérisation

Figure 29: ACV générale

## 4.4 Comparaison

Afin de comparer l'assemblage des Analyses Cycle de Vie réalisées dans le cadre de ce mémoire, une comparaison avec une étude similaire effectuée sur une usine basée en Suisse a été réalisée. L'étude en question était déjà présente dans le logiciel SIMAPRO. Pour réaliser cette comparaison, il a été nécessaire d'assembler sur SIMAPRO les différentes ACV réalisés par l'auteur : de limestone, unprocessed (la carrière) ; limestone, crushed, washed (la dépendance) ainsi que lime production.

D'après le diagramme suivant (figure n°30) faisant référence à l'étude réalisée en Suisse, l'étape la plus responsable des impacts environnementaux est l'étape de production de chaux avec 63 % (couleur orange). La seconde étape qui participe aux impacts est l'extraction de la matière première avec 20.4 % (couleur vert foncé). Pour terminer, la dépendance, quant à elle, participe à 16.5 % des impacts environnementaux (couleur vert foncé).

Toujours selon les résultats de l'Analyse Cycle de Vie de la fabrication de chaux de l'usine suisse (voir tableau n°12 en annexe 6), les trois catégories d'impacts les plus touchées sont :

- la toxicité humaine non cancérigène, dont la production de chaux est la cause pour 64.5 %, la carrière pour 19.3 % et la dépendance pour 16.2 % ;
- le changement climatique, dont la production de chaux est la cause pour 30.1 %, la carrière pour 43.1 % et la dépendance pour 26.8 % ;
- le rayonnement ionisant, dont la production de chaux est la cause pour 93.8 %, 4.7 % pour la dépendance et de 1.5 % pour la carrière.

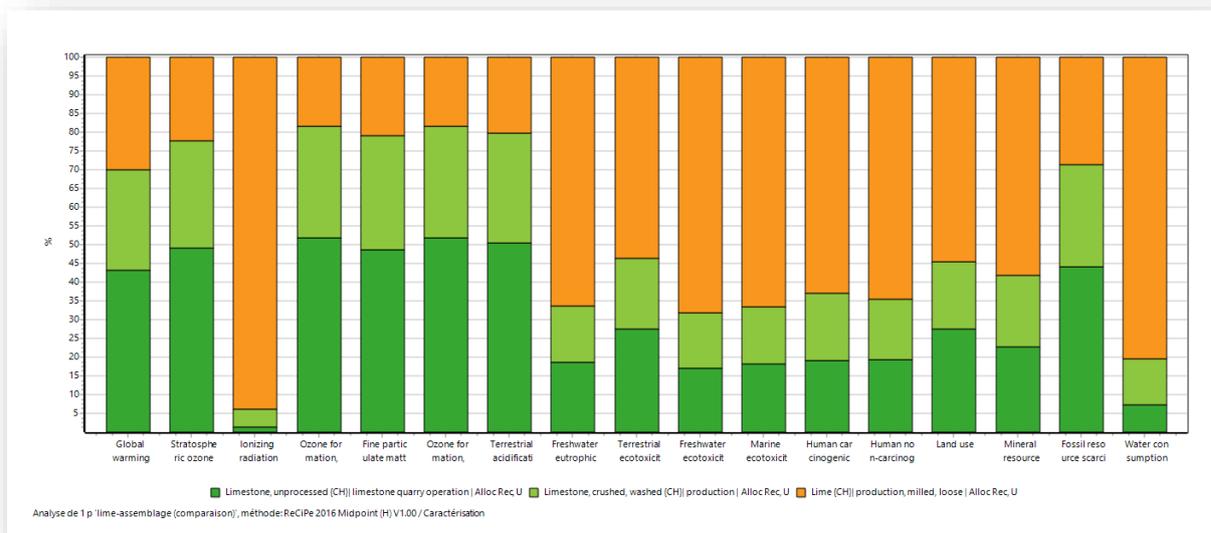


Figure 30: ACV de la fabrication de chaux en Suisse

En conclusion, pour l'Analyse Cycle de Vie de l'entreprise basée en Suisse et l'ACV de Carmeuse, la production de chaux est l'étape du procédé la plus responsable des impacts environnementaux (voir tableau n°4). Les positions s'inversent concernant les deux impacts environnementaux suivants : l'extraction de la matière première et la dépendance. En effet, alors que dans l'étude réalisée sur la société Carmeuse (qui fait l'objet de ce mémoire), c'est la dépendance qui est le deuxième impact le plus important causé par la fabrication de chaux et l'extraction de la matière première en dernière position, c'est l'inverse pour l'usine basée en Suisse.

Tableau 4: comparaison des ACV (Carmeuse-Suisse)

	Carrière	Dépendance	Production de chaux
Carmeuse	10,3%	19%	70,7%
Suisse	20,4%	16,5%	63%

La différence des résultats est due à un manque d'informations en ce qui concerne l'Analyse Cycle de Vie de Carmeuse. En effet, pour l'ACV de la carrière, il aurait été intéressant d'inclure plusieurs données supplémentaires comme les quantités et les types de déchets générés au sein de la carrière, le transport (le nombre de kilomètres effectués par les engins), le type d'eau pompée dans la carrière, le traitement des déchets, la superficie de la carrière...

Pour ce qui est de l'ACV du travail de la pierre (la dépendance), les informations manquantes sont, par exemple, les quantités et les types de déchets générés ainsi que le traitement de ces déchets, des informations sur les bandes transporteuses (la quantité de caoutchouc utilisé, les matériaux de construction...), plus d'informations sur le bassin de décantation pour les eaux de lavage...

Quant à l'ACV de la production de chaux, les données absentes sont les quantités et les types de déchets générés ainsi que leurs traitements, les matériaux de construction des fours et du broyage, la quantité de substances ajoutées pour produire de la chaux (lubrifiant utilisé en aval dans les fours pour le broyage, la quantité d'additifs utilisés dans la phase de broyage ainsi que leurs compositions...).

De plus, l'électricité suisse est plus propre que l'électricité belge. En effet, la production d'électricité nette en Belgique pour l'année 2016 provient majoritairement du nucléaire avec 51.7 % (Fédération Belge des Entreprises électriques et gazières, 2018). Tandis que la production d'électricité suisse pour 2016 découle de l'hydroélectrique avec 59.9 % (Office fédéral de l'énergie, 2018). Par conséquent, pour l'usine suisse, l'impact environnemental sera plus faible qu'en Belgique (d'où cette différence dans les valeurs avec l'analyse réalisée sur la société Carmeuse).

Il est important de préciser également que le type de fuel utilisé pour alimenter les engins ainsi que l'alimentation des fours sont différents entre l'usine de Suisse et celle de Carmeuse, ce qui amène aux écarts de pourcentage (cf : tableau n°4).

## Chapitre 5 : Pistes d'amélioration

Cette partie sera consacrée uniquement à des pistes d'amélioration au niveau de la production de chaux car c'est l'étape de la fabrication de chaux qui cause le plus d'impacts environnementaux (70.7% pour Carmeuse et 63% pour l'usine en Suisse).

Selon l'European Commission (2001), les principaux problèmes environnementaux liés à la production de la chaux sont la pollution de l'air et l'utilisation de l'énergie. La majorité des émissions dans l'environnement sont :

- les poussières ;
- les oxydes d'azote (NOx) : les émissions de NOx dépendent principalement de la qualité de la chaux produite et de la conception du four ;
- le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) : les émissions de SO<sub>2</sub> dépendent de la teneur en soufre du combustible, de la conception du four et de la teneur en soufre requise de la chaux produite. La sélection de carburants à faible teneur en soufre permet donc de limiter les émissions de SO<sub>2</sub>, de même que la production de chaux à teneur plus élevée en soufre ;
- le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) : le processus de production de la chaux implique l'émission de grandes quantités de CO<sub>2</sub>, principal acteur du changement climatique, comme le montre l'Analyse Cycle de Vie de Carmeuse ainsi que de l'usine en Suisse. En effet, la production de 1 t de chaux entraîne l'émission d'environ 1,2 t de CO<sub>2</sub> (Journal officiel de l'Union Européenne, 2013), ce qui fait de la chaux l'un des matériaux les plus associés aux émissions spécifiques de CO<sub>2</sub>.

Pour améliorer les performances de production et réduire les consommations énergétiques, le type de four est très important (Journal officiel de l'Union Européenne, 2013). En effet, selon le type de four, la consommation d'électricité va varier (voir tableau n° 5). Cependant, la consommation d'énergie dépend également du type produit et de la qualité du produit, des conditions de traitement et des matières premières.

Tableau 5: Consommation d'énergie par rapport au type de fours

Type de four	Consommation d'énergie thermique en GJ/Tonne
Fours rotatifs longs	6 - 9.2
Fours rotatifs avec préchauffeur (PRK)	5.1 - 7.8
Fours à flux parallèles à régénération (PFRK)	3.2 - 4.2
Flux verticaux annulaires (ASK)	3.3 - 4.9
Flux verticaux à alimentation mixte (MFSK)	3.4 - 4.7
Autres fours	3.4 – 7

La société Caremeuse exploite deux types de four sur le site de production de Moha : un PFRK et un PRK. Afin d'améliorer la performance globale et limiter les impacts néfastes sur l'environnement, il serait recommandable d'investir dans le remplacement du four PRK en un nouveau four PFRK car comme le démontre le tableau ci-dessus, celui-ci est plus performant au niveau énergétique.

En outre, la réduction de la consommation d'énergie peut s'établir par récupération de la chaleur des gaz d'échappement. La réduction d'énergie électrique, quant à elle, peut être obtenue par des équipements électriques à haut rendement énergétique (European Commission, 2001).

Le choix du combustible pour la calcination est également important car, d'une part, le coût du carburant par tonne de chaux peut représenter entre 40 à 50% du coût de production ; d'autre part, le carburant peut influencer la qualité de la chaux ainsi que la réactivité. De plus, le choix du combustible peut influencer sur les niveaux d'émission de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de monoxyde de carbone (CO), de fumée, de poussière, de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), qui ont tous un impact sur l'environnement (European Commission, 2001).

A titre d'exemple, voici les émissions de CO<sub>2</sub> lors d'une combustion selon le type de combustible utilisé pour alimenter les fours (Energie plus, 2018) :

Tableau 6: Emissions de CO<sub>2</sub> selon le type d'énergie

Type d'énergie	Emission d'équivalent CO <sub>2</sub> pour la combustion [g/kwh <sub>PCI</sub> ]
Gaz naturel	202
Fioul lourd	281
Fioul domestique	271
Propane	231
Charbon	341

D'après ce tableau, la combustion du charbon est le phénomène le plus impactant en ce qui concerne les émissions de CO<sub>2</sub> contrairement au gaz naturel. Carmeuse pourrait utiliser uniquement comme combustible le gaz naturel pour alimenter les fours et éviter d'utiliser le lignite, qui est du charbon composé de 65 à 75 % de carbone. Néanmoins, cette solution sera objectivement plus onéreuse.

Enfin, les meilleures techniques disponibles pour réduire les émissions de poussières sont d'une part de minimiser et faire de la prévention des émissions de poussières provenant de sources fugitives et, d'autre part, d'éliminer de manière efficace les particules des sources ponctuelles par l'application de filtres à manches ou encore de dépoussiéreurs électrostatiques (European Commission, 2001).

## Conclusion

Afin d'évaluer les impacts environnementaux de la production de chaux, une Analyse Cycle de Vie doit être réalisée. L'ACV est la prise en compte des impacts environnementaux de l'extraction des matières premières nécessaires à son élaboration jusqu'à son élimination en fin de vie, dit du « berceau à la tombe » (Eggermont. D., 2013 ; Reid et al., 2009).

La réalisation d'une Analyse Cycle de Vie est une méthode assez complexe à effectuer. En effet, l'ACV comporte quatre étapes. Premièrement, le but et les objectifs doivent être explicités en précisant l'unité fonctionnelle (unité de référence), la frontière du système, les systèmes des produits et processus élémentaires, la méthodologie d'évaluation, les limitations ou la coupure du système ainsi que la qualité des données.

Deuxièmement, la réalisation de l'inventaire du cycle de vie doit être faite. Cette étape est la plus longue et la plus complexe car la récolte de données que sont les flux entrants (énergie, matière première...) et flux sortants du système (émissions atmosphériques, déchets, pollution de l'eau...), demande énormément de temps.

Troisièmement, l'évaluation de l'impact du cycle de vie, consiste à transformer l'ensemble des flux recensés durant l'inventaire du cycle de vie en impacts environnementaux via une série d'indicateurs. Cette étape comprend la classification qui consiste à répertorier les flux émis et consommés recensés dans des différentes catégories d'impacts (méthode mid-point et end-point), la caractérisation qui consiste à multiplier les différents flux par les facteurs de caractérisation afin de calculer leur contribution aux diverses catégories d'impacts, la normalisation qui consiste à diviser les résultats de la phase de caractérisation par des facteurs de normalisation et la pondération qui est l'obtention d'un score unique en fonction de l'importance relative des diverses catégories d'impacts.

Quatrièmement, l'interprétation du cycle de vie est la dernière phase de l'Analyse Cycle de Vie. Le but de cette dernière étape est d'analyser les résultats obtenus précédemment, de vérifier la cohérence des résultats avec les objectifs et le champ de l'étude ainsi que de tirer des conclusions aux limites de l'étude et fournir des recommandations.

L'Analyse Cycle de Vie de la chaux vive a été réalisée. Afin de réaliser cette ACV, les données de la société Carmeuse ont été récoltées. Carmeuse est une entreprise qui fabrique de la chaux et dont la mission principale est d'être reconnue comme référence mondiale dans la production de chaux et de calcaire.

La fabrication de chaux comporte plusieurs étapes. Premièrement, l'étape de l'extraction de la roche calcaire. Cette étape comprend la découverte, l'extraction, le forage et le minage (tirs de mines). Deuxièmement vient le travail de la pierre, qui est la « dépendance » d'une carrière, et qui consiste à avoir une bonne granulométrie de pierre calcaire pour pouvoir l'introduire dans les fours. Troisièmement, la calcination de la pierre peut être faite dans les fours afin de produire de la chaux.

La fabrication de chaux provoque des impacts environnementaux non négligeables comme les émissions atmosphériques (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, les poussières...), les impacts énergétiques provoqués par les énergies électriques et fossiles, les impacts sur l'eau (matières en suspension, pollution de la nappe phréatique...), les impacts du bruit et des vibrations (tirs de mines, forage, broyeur...), les impacts sur le paysage et l'occupation du sol, les impacts sur la faune et la flore ainsi que la génération de déchets.

Une fois les objectifs fixés et l'inventaire établi, l'Analyse Cycle de Vie a pu être réalisé, grâce au logiciel SIMAPRO. Les résultats de l'ACV de la fabrication de chaux de la société Carmeuse montre que la production de chaux est responsable de 70.7% des impacts environnementaux, le travail de la pierre (dépendance) pour 19% et la carrière 10.3%. Les deux catégories d'impacts les plus touchées sont le changement climatique et la toxicité humaine non cancérigène.

Les résultats obtenus lors de l'assemblage des ACV ont été comparés avec une étude similaire réalisée sur une usine basée en Suisse. Pour ce qui est de l'Analyse Cycle de vie de l'entreprise basée en Suisse, les résultats montrent que la production de chaux est responsable de 63% des impacts environnementaux, la carrière pour 20.4% et le travail de la pierre (dépendance) pour 16.5%. Les deux catégories d'impacts les plus touchées sont également la toxicité humaine non cancérigène et le changement climatique. La divergence entre les deux études se situe dans le positionnement de l'étape de l'extraction de la matière première et de l'étape du travail de pierre.

La différence de pourcentage entre les deux ACV est due à un manque d'information en ce qui concerne l'ACV de Carmeuse comme par exemple le transport, la génération de déchets, les matériaux de construction des fours, des bandes transporteuses...

Au vu des résultats délivrés par l'ACV, des recommandations ont été proposées afin d'améliorer les performances globales et de minimiser les impacts environnementaux engendrés par la production de chaux chez la société Carmeuse (70.7%) :

- Au niveau de la consommation énergétique, le choix du four est très important car selon le type de four, la consommation d'électricité varie. Il serait donc recommandable d'investir dans le remplacement du four PRK (Four rotatif avec préchauffeur), qui consomme entre 5.1-7.8 GJ d'énergie thermique, en un nouveau four PFRK (four à flux parallèles à régénération) qui lui consomme entre 3.2- 4.2 GJ d'énergie thermique.
- Au niveau du combustible, le choix de celui-ci peut influencer sur les niveaux d'émissions atmosphériques (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, les poussières). Le gaz naturel est pour le moment le combustible le moins impactant. Pour cette raison, Carmeuse devrait utiliser uniquement le gaz naturel pour alimenter leurs fours et éviter l'utilisation du lignite.
- Au niveau de la réduction des émissions de poussières, les meilleures techniques disponibles sont de minimiser et faire de la prévention des émissions de poussières provenant de sources fugitives ainsi que d'éliminer de manière efficace les particules des sources ponctuelles par l'application de filtres à manches ou encore de dépoussiéreurs électrostatiques.

## Bibliographie

Carmeuse (2018), Développement durable, <http://www.carmeuse.eu/fr/durabilite> , consulté le 18/12/2017

Carmeuse (2018), Nos valeurs, <http://www.carmeuse.eu/fr/propos/nos-valeurs> , consulté le 16/12/2017

Carmeuse SA, Enjeux environnementaux, <http://www.carmeuse-hemptinne.be/les-enjeux/enjeux-environnementaux.html> , consulté le 25/01/2018 (accord de branche et biodiversité)

Costdoat, S. (2012). L'analyse du cycle de vie (ACV) : outil ou contraintes pour la compétitivité des entreprises ? *Annales Des Mines-Réalités Industrielles*, 170(2005), 9–12. <https://doi.org/10.3917/re.066.0013>

DGO3 (2010). Les carrières en Wallonie : un monde à redécouvrir, 133. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Dron, D. (2012). L'analyse du cycle de vie : le point de vue des pouvoirs publics. *Annales Des Mines - Responsabilité et Environnement*, N° 66(2), 10. <https://doi.org/10.3917/re.066.0010> , consulté le 19/02/2018

Ecoinvent (2018), <https://www.ecoinvent.org/about/about.html> , consulté le 16/05/2018

Eggermont, D. (2013). Méthodes d'analyse environnementale - Analyse de cycle de vie, Bilan CO2, Empreinte, 30.

Encem. (2011). Carrières, Poussière et Environnement. Charte Environnement Des Industries de Carrières, 0–87.

Encyclopædia Universalis (2018), [https://www.universalis.fr/encyclopedie/premier-choc-petrolier/#i\\_19953](https://www.universalis.fr/encyclopedie/premier-choc-petrolier/#i_19953) , consulté le 6/05/2018

Energie plus (2018), Les émissions de polluants liée à la consommation énergétique, <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15568#c9709> consulté le 19/05/2018

ESU-services (2018), Ecoinvent, <http://esu-services.ch/fr/banque-de-donnees/ecoinvent/>, consulté le 8/05/2018

European Commission. (2001). Reference document on best available techniques in the cement and lime manufacturing industries, (December), 1–111. Retrieved from [http://old.vpvb.gov.lv/ipcc/bat/bat\\_ES1/ECementaKalku\\_raz.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Reference+document+on+best+available+techniques+in+the+cement+and+lime+manufacturing+industries#1](http://old.vpvb.gov.lv/ipcc/bat/bat_ES1/ECementaKalku_raz.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Reference+document+on+best+available+techniques+in+the+cement+and+lime+manufacturing+industries#1) consulté le 19/05/2018

EVEA (2018), SIMAPRO, <https://network.simapro.com/evea/> consulté le 16/05/2018

Fédération Belge des Entreprises électriques et gazières (2018), <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite> consulté le 18/05/2018

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>

Google maps (2018), carrière de Moha, <https://www.google.be/maps/search/carrière+de+moha/@50.5445326,5.175354,15826m/data=!3m1!1e3> , consulté le 1/03/2018

Gosselin.G (2008), Le secteur carrier : un monde en (r)évolution, Incitec, Belgique.

Horacio. F (2015), Demande d'autorisation d'extension d'une carrière de Pierres du lot : étude d'impact, commune d'Espère (France).

Humbert, S., Margni, M., Jolliet, O., & PRe, various authors. (2015). IMPACT 2002 + : User Guide. *Work*, 21, 36. Retrieved from <http://www.pre-sustainability.com/download/DatabaseManualMethods.pdf>

Ingénierie et Conseil en Environnement et Aménagement (2018), <https://www.icea-web.com/prestations/constructions-aménagements-et-infrastructures/gestion-des-eaux-d-exhaure-en-nappe-et-protection-des-structures-enterrées/> consulté le 15/05/2018

Journal officiel de l'Union européenne (2013), DÉCISION D'EXÉCUTION DE LA COMMISSION du 26 mars 2013 établissant les conclusions sur les meilleures techniques disponibles (MTD) pour la production de ciment, de chaux et d'oxyde de magnésium, au titre de la directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil relative aux émissions industrielles D. E. L. A. (2013). 9.4.2013, (5), 1–45.

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, 2018), <http://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/analyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv> consulté le 24-11-2017

Laborieux Elie (2009), Les problèmes de développement et de l'environnement, Université des Antilles et de la Guyane, Science Economie et Gestion,

<https://www.memoireonline.com/05/09/2041/les-problemes-du-developpement-de-lenvironnement.html> consulté le 21/05/2018

Martaud, T. (2009). Evaluation environnementale de la production de granulats naturels - Indicateurs, Modèles et Outils -. *Environmental Research*.

National Lime Association (2018), How Lime is Made, <https://www.lime.org/lime-basics/how-lime-is-made/> , consulté le 18/12/2017

Nicolás Honorato Cavadas (2004), Évaluation environnementale des carrières de Pierre Bleue de Wallonie : possibilité d'implantation de technologies plus propres et évaluation de leurs impacts, Université Libre de Bruxelles

Office fédéral de l'énergie (2018), Statistique globale de l'énergie Suisse, [http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier\\_id=00763](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00631/index.html?lang=fr&dossier_id=00763) consulté le 18/05/2018

Reid, C., Lesage, P., Margni, M., Aubertin, M., Bécaert, V., Deschênes, L., & Montréal, É. P. De. (2009). Utilisation de l'ACV par l'industrie minière : Exemple d'application et principaux défis, 10–18.

Sagastume Gutiérrez, A., Van Caneghem, J., Cogollos Martínez, J. B., & Vandecasteele, C. (2012). Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 31, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.035>

Thériault, N. (2011). Dans le cadre d'une ACV, conception d'un outil d'aide à la sélection d'un jeu de catégories d'impact pour les entreprises européennes et nord-américaines du secteur textile, 126.

Union nationale des producteurs de granulats (2018), Les carrières terrestres : les 5 étapes du processus industriel, <http://www.unpg.fr/accueil/nos-activites/comment-sont-ils-produits/les-carrieres-terrestres/> , consulté le 4/12/2017

United Nation (2018), World Summit on Sustainable Development (WSSD), Johannesburg Summit <https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/wssd> consulté le 8/05/2018

Université Virtuelle Environnement & Développement Durable (2012), Méthodologie de l'analyse cycle de vie (ACV), France, [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03\\_010\\_acv\\_4.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03_010_acv_4.html) , consulté le 27/11/2017

Vincent-Sweet, Pénélope (2012), Analyse du cycle de vie et protection de l'environnement : pertinence et limites de l'outil : Le point de vue d'une association, Responsabilité & Environnement ; Paris N° 66 : 84-88,103,105,107-108,110.

Wikipédia (2018), Equivalent CO2, [https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quivalent\\_CO2](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89quivalent_CO2) consulté le 21/05/2018

# **ANNEXES**

## Annexe 1 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de la carrière

Tableau 7: résultats de l'ACV de la carrière

Résultat de l'ACV de la Carrière						
Catégorie d'impact	Unité	Total	Limestone	Diesel	Blasting	Electricity
Global warming	kg CO2 eq	1489561	266	3E+05	1794,2	1138180,1
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	1,192555	0	0,688	2,61E-02	4,79E-01
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	1651432	0	35307	26,3202	1616098
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	2851,929	0	1389	113,44	1349,0473
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1267,057	0	779,7	3,85821	483,54144
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	2981,013	0	1498	115,603	1367,0481
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4389,232	0	2602	82,1756	1704,5631
Freshwater eutrophication	kg P eq	104,3561	0	33,25	0,36765	70,7387
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	403,3097	0	153,1	1,19146	249,05804
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	8745,153	0	2834	37,2978	5873,5772
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DBC e	15273,64	0	5230	53,9059	9989,3997
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	17332,79	0	6572	91,1008	10669,987
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	10796990	0	3E+06	36555,7	7519075,1
Land use	m2a crop eq	169567	0	5129	35,6106	164402,2
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	2628,221	0	627,4	9,06405	1991,7605
Fossil resource scarcity	kg oil eq	1266956	0	9E+05	276,362	318217,71
Water consumption	m3	1650205	1633970	5187	14,456	11033,536

## Annexe 2 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie du travail de la pierre

Tableau 8: Résultats de l'ACV du travail de la pierre

Résultat de l'ACV du travail de la pierre					
Catégorie d'impact	Unité	Total	Limestone	Diesel	Electricity
Global warming	kg CO2 eq	1775501,8	0	52239,672	1723262,1
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0,82608424	0	0,1014576	7,25E-01
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	2452491,6	0	5637,6731	2446853,9
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	2250,4749	0	207,94919	2042,5257
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	847,6067	0	115,50057	732,10614
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	2293,8114	0	224,03152	2069,7798
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	2966,5711	0	385,7765	2580,7946
Freshwater eutrophication	kg P eq	112,20161	0	5,0996451	107,10196
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	402,21308	0	25,12664	377,08644
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	9334,7936	0	441,90143	8892,8921
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DBC e	15932,13	0	807,67486	15124,455
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	17179,084	0	1024,1849	16154,899
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	11888367	0	504107,52	11384259
Land use	m2a crop eq	249852,52	0	939,2857	248913,23
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	37662075	37658961	98,721125	3015,6259
Fossil resource scarcity	kg oil eq	621316,24	0	139518,58	481797,66
Water consumption	m3	17472,517	0	767,18656	16705,33

## Annexe 3 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de la production de chaux

Tableau 9: Résultats de l'ACV de la production de chaux

Résultat de l'ACV de la production de chaux							
Catégorie d'impact	Unité	Total	quicklime	natural gas	lignite	Diesel	electricity
Global warming	kg CO2 eq	2,39E+08	1,90E+08	49360964	4067,2514	448,98113	335809,05
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	14,503777	0	1,44E+01	4,74E-04	8,72E-04	0,14120671
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	1326729,5	0	8,50E+05	79,830567	48,453766	476814,11
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	28870,261	0	2,85E+04	5,4689146	1,7872483	398,02338
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	17219,987	0	1,71E+04	3,6141635	0,99268568	142,66423
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	30442,352	0	3,00E+04	5,833341	1,9254701	403,33435
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	47705,116	0	4,72E+04	7,464337	3,3156098	502,91489
Freshwater eutrophication	kg P eq	2619,2066	0	2,59E+03	8,6426654	0,04382961	20,87077
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	1768,6574	0	1,69E+03	1,0417828	0,2159544	73,482169
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	128289,24	0	1,26E+05	196,35717	3,7979833	1732,9422
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DBC e	243620,35	0	2,40E+05	271,93833	6,941674	2947,2759
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	282787,41	0	2,79E+05	379,91315	8,8024997	3148,0767
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	1,01E+08	0	98397548	198206,82	4332,6222	2218430,5
Land use	m2a crop eq	117165,71	0	6,86E+04	23,309865	8,0728216	48505,283
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	6815615,4	6799356,4	1,57E+04	0,9276863	0,84847245	587,64971
Fossil resource scarcity	kg oil eq	18206353	0	18110301	965,35237	1199,1118	93887,061
Water consumption	m3	81794,345	0	7,85E+04	7,2053486	6,5936917	3255,3382

## Annexe 4 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de l'Assemblage des ACV

Tableau 10: Résultats de l'ACV de l'assemblage

Résultats de l'ACV de l'assemblage					
Catégorie d'impact	Unité	Total	Limestone	Quicklime	Limestone-dépendance
Global warming	kg CO2 eq	2,47E+08	4692117	2,39E+08	3195903,2
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	19,747276	3,7565476	1,45E+01	1,49E+00
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	10943225	5202010,2	1,33E+06	4414484,9
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	41904,692	8983,5766	2,89E+04	4050,8548
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	22736,907	3991,2283	1,72E+04	1525,6921
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	43961,403	9390,1909	3,04E+04	4128,8604
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	66871,025	13826,081	4,77E+04	5339,8279
Freshwater eutrophication	kg P eq	3149,8911	328,72168	2,62E+03	201,96289
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	3763,0665	1270,4256	1,77E+03	723,98354
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	172639,11	27547,233	1,28E+05	16802,628
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DBC e	320410,16	48111,972	2,44E+05	28677,834
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	368308,06	54598,299	2,83E+05	30922,351
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	1,56E+08	34010518	1,01E+08	21399060
Land use	m2a crop eq	1101036,2	534136	1,17E+05	449734,54
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	74615630	8278,8945	6,82E+06	67791736
Fossil resource scarcity	kg oil eq	23315635	3990912,6	18206353	1118369,2
Water consumption	m3	5311391,2	5198146,3	8,18E+04	31450,53

## Annexe 5 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie générale

Tableau 11: Résultats de l'ACV générale

Résultats de l'ACV générale			
Catégorie d'impact	Unité	Total	ACV
Global warming	kg CO2 eq	2,47E+08	2,47E+08
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	19,747276	19,747276
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	10943225	10943225
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	41904,692	41904,692
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	22736,907	22736,907
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	43961,403	43961,403
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	66871,025	66871,025
Freshwater eutrophication	kg P eq	3149,8911	3149,8911
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	3763,0665	3763,0665
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	172639,11	172639,11
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DBC e	320410,16	320410,16
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	368308,06	368308,06
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	1,56E+08	1,56E+08
Land use	m2a crop eq	1101036,2	1101036,2
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	74615630	74615630
Fossil resource scarcity	kg oil eq	23315635	23315635
Water consumption	m3	5311391,2	5311391,2

## Annexe 6 : Résultats de l'Analyse Cycle de Vie de l'Assemblage des ACV Suisse

Tableau 12: Résultats de l'ACV de la production de chaux en Suisse

Résultats de l'ACV assemblage (comparaison)					
Catégorie d'impact	Unité	Total	limestone	Limestone (crush)	Lime
Global warming	kg CO2 eq	15,841927	6,8360929	4,2419783	4,7638555
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	4,67E-05	2,30E-05	1,33E-05	1,04E-05
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	6,7817668	0,0988246	0,31932741	6,3636147
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,28845046	0,1495945	0,08601692	0,05283908
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,075266068	0,0366742	0,02292037	0,01567154
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0,29370747	0,1522642	0,0875709	0,05387233
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,18456842	0,093028	0,05404185	0,03749857
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,003193207	0,0005934	0,00047806	0,00212173
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	0,009594454	0,0026316	0,00181744	0,00514546
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB e	0,35267586	0,0601726	0,0517926	0,24071066
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DBC e	0,49880218	0,090178	0,07592397	0,33270025
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	0,90661271	0,1731754	0,16352995	0,56990734
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DBC e	328,53461	63,463436	53,190022	211,88115
Land use	m2a crop eq	0,95799898	0,2643084	0,17179652	0,52189406
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0,075243487	0,0171751	0,01422204	0,04384631
Fossil resource scarcity	kg oil eq	4,6046044	2,0279378	1,2548233	1,3218433
Water consumption	m3	1,2644257	0,0911299	0,15640642	1,0168894
Total		360,6734939	73,55724	59,8926814	227,223571