
Analyse du cycle de vie d'une centrale hydroélectrique

Auteur : Dewandre, Laurent

Promoteur(s) : 3200; 2540

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en énergies renouvelables

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3367>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Année 2016-2017

Analyse de l'impact environnemental de la centrale hydroélectrique du barrage Bacquelaine à Chaufontaine selon les normes ISO 14 040 et 14 044

Mémoire présenté par Laurent Dewandre

En vue de l'obtention des grades de

Master en science et gestion de l'environnement – finalité énergie renouvelable (ULg)

Master en développement durable – finalité Energie-environnement (uni.lu)



Analyse de l'impact environnemental de la centrale hydroélectrique du barrage Bacquelaine à Chaufontaine selon les normes ISO 14 040 et 14 044

Laurent Dewandre

Mémoire présenté par Laurent Dewandre

En vue de l'obtention des grades de

Master en science et gestion de l'environnement – finalité énergie renouvelable (ULg)

Master en développement durable – finalité Energie-environnement (uni.lu)

Promoteur : Olivier Lottin

Comité de Lecture : Olivier Lottin, Stefan Maas, Stéphane Verraes, Fabien Claude, Sébastien Ericpum.

Remerciements

Je tiens à remercier :

Olivier Lottin pour le suivi et les avis apportés sur ce travail ;

Stéphane Verraes pour l'accueil qu'il m'a fait au sein du bureau d'études MTBE et pour son aide ;

Christophe Burton pour les conseils et les avis nécessaires à l'élaboration de ce travail ;

Denis Rutten pour les informations techniques prodiguées ;

Benoit Cozannet pour les avis et discussions entretenues durant la réalisation de ce travail

Hassan Zoungrana pour les données techniques fournies ;

Rodrigo Rodrigues pour le soutien apporté ;

Guillaume Pierret pour les conseils de réalisation de ce travail ;

Niels Duchêne pour les données de projet communiquées ;

Mes parents André Dewandre et Michele Amand pour le soutien apporté ;

Ma sœur Marie Dewandre pour la relecture de ce travail ;

Enfin, toutes les personnes qui de prêt ou de loin et de quelque manière que ce soit m'ont apporté leur soutien.

Table des matières

Introduction.....	9
1. Bibliographie.....	12
1.1. Qu'est-ce qu'une ACV.....	12
1.2. Pourquoi réaliser une ACV	13
1.3. Comment réaliser une ACV	14
1.3.1. Définition des objectifs et du champ :	14
1.3.2. Inventaire des émissions et des extractions	16
1.3.2.1. Validation des données	17
1.3.2.2. Rattachement des données au processus élémentaire et à l'unité fonctionnelle....	17
1.3.2.3. Affinage de la frontière du système	17
1.3.2.4. Affectation des flux aux processus élémentaires.....	17
1.3.3. Evaluation des impacts du cycle de vie	17
1.3.3.1. Sélection des catégories d'impact, des modèles de caractérisation et des indicateurs de catégories	18
1.3.3.2. Attribution des résultats de l'inventaire	19
1.3.3.3. Calcul des résultats d'indicateur de catégories.....	19
1.3.3.4. Standardisation de la méthode	19
1.3.4. Interprétation du cycle de vie	20
1.4. La centrale hydroélectrique à vis d'Archimède.....	21
1.4.1. Principe de fonctionnement.....	22
2. Matériel et méthode	23
2.1. Définitions des objectifs et du champ.....	23
2.1.1. Objectifs.....	23
2.1.2. Champ.....	24
2.1.2.1. La centrale hydroélectrique sur le barrage Bacquelaine de Chaudfontaine.....	24
2.1.2.2. Fonctions du produit	25
2.1.2.3. Unité fonctionnelle.....	25
2.1.2.4. Frontières du système	26
2.1.2.5. Affectation	28
2.1.2.6. Méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impacts.....	28
2.1.2.7. L'agrégation des résultats de l'évaluation de l'inventaire du cycle de vie des sous-produits et processus élémentaires	33
2.1.2.8. La collecte des données.....	34
2.1.2.9. Exigences portant sur les données.....	36

2.1.2.10.	Traitement des données manquantes	37
2.1.2.11.	Hypothèses	37
3.	Résultats	41
3.1.	Inventaire du cycle de vie	41
3.1.1.	Résultats d'inventaire	41
3.1.1.1.	Génie Civil	41
3.1.1.2.	Electromécanique	42
3.1.1.3.	Ferronnerie	43
3.1.1.4.	Turbinage	43
3.1.1.5.	Divers	43
3.1.2.	Validation des données	44
3.1.3.	Rattachement des données au processus élémentaire et à l'unité fonctionnelle	44
3.1.4.	Affinage de la frontière du système	45
3.2.	Evaluation de l'impact du cycle de vie	46
3.2.1.	Attribution des flux aux catégories d'impacts	46
3.2.2.	Catégorisation des flux dans les catégories d'impact	46
3.2.3.	Impacts environnementaux de la centrale de Chaudfontaine	46
3.2.3.1.	Analyse selon les étapes du cycle de vie	47
3.2.3.2.	Analyse selon les secteurs de la centrale hydroélectrique	50
3.2.4.	Comparaison des systèmes de production d'énergie électrique	52
3.2.4.1.	Comparaison avec le mix électrique européen	52
3.2.4.2.	Comparaison avec le mix hydroélectrique européen	55
3.2.4.3.	Comparaison avec le mix éolien européen	56
3.2.4.4.	Comparaison de la centrale avec le photovoltaïque	59
3.2.4.5.	Comparaison de la centrale avec la production électrique au moyen de charbon ..	60
3.2.4.6.	Comparaison de la centrale avec la production d'électricité nucléaire	61
3.2.5.	Conclusion	61
3.3.	Interprétation des résultats	63
3.3.1.	Le contexte de l'analyse	63
3.3.2.	Représentativité des résultats obtenus	63
3.3.3.	Représentativité du système étudié	64
3.3.4.	Représentativité du cas étudié par rapport aux références de MTBE s.a.	64
3.3.5.	Utilisations des ressources gratuites	66
3.3.6.	L'utilisation des FDES et PEP	67
3.3.7.	Impact du statut du réalisateur de l'analyse du cycle de vie	67
3.3.8.	Importance du volet informatif	68

3.3.9.	L'influence des aides gouvernementales	68
3.3.10.	Le génie civil multigénérationnel	69
3.3.11.	Intégration du modèle d'ACV au développement du panel d'offres de MTBE s.a.	71
3.3.12.	L'incertitude liée aux processus environnementaux.....	72
3.3.13.	L'économie d'échelle de la production énergétique.....	73
3.3.14.	Le kilomètre parcouru en voiture.....	74
3.3.15.	Temps de retour énergétique	74
3.4.	Discussion	75
4.	Conclusion	77
Annexe 1 : Tableau reprenant la source de données pour chaque sous-système.		85
Annexe 2 : métré du génie civil		87
Annexe 3 Liste des composants de la centrale.		90
Annexe 4 : Données d'inventaire communiquées par Spaans Babcock		93
Annexe 5 calcul pour l'inventaire de cycle de vie		94
Génie civil		94
Béton		94
Acier d'armature		94
Bloc de béton.....		94
Porte		94
Fenêtre		94
Crépis.....		94
Panneau de toiture.....		94
Barrière de limitation du site		94
Electromécanique.....		94
Ferronnerie.....		95
Turbinage.....		95
Vis hydrodynamique.....		95
Boîte de vitesse		96
Alternateur		96
Divers.....		96
Bouche de ventilation		96
Thermostat de régulation thermique.....		98
Convecteur		98
Kit de vidéo surveillance.....		99

Table des graphiques

Graphique 1 : comparaison des modes de transport (Greendelta, n.d.)	40
Graphique 2 : comparaison de l'impact selon les étapes du cycle de vie	48
Graphique 3 : comparaison de l'impact selon les secteurs de la centrale	50
Graphique 4 : comparaison environnementale de la centrale et du mix électrique européen	53
Graphique 5 :cComparaison de la centrale et du mix hydroélectrique	55
Graphique 6 : comparaison avec le mix éolien européen (Greendelta, n.d.)	56
Graphique 7 : comparaison de la centrale avec un parc éolien offshore de 160 MW (Greendelta, n.d.)	57
Graphique 8 : comparaison de la centrale avec le photovoltaïque (Greendelta, n.d.).....	59
Graphique 9 : comparaison de la centrale avec la production électrique au charbon (Greendelta, n.d.)	60
Graphique 10 : comparaison de la centrale avec la production d'électricité nucléaire (Greendelta, n.d.)	61
Graphique 11 : Comparaison de la production de d'électricité à partir du gaz selon la puissance des centrales	73

Table des tableaux

Tableau 1 : données de flux de matériaux et produits pour le génie civil	41
Tableau 2 : composition d'un mètre cube de béton prise en compte.....	41
Tableau 3 : inventaire de sous-produits utilisés pour la centrale.	42
Tableau 4 : inventaire des données issues de la société Spaans Babcock	43
Tableau 5 : impact environnemental de la production d'un kWh par la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine sur le barrage Bacquelaine	47
Tableau 6 : comparaison environnementale de la centrale et du mix électrique européen (Greendelta, n.d.)	53
Tableau 7 : comparaison de la centrale et du mix hydroélectrique.....	55
Tableau 8 : comparaison de la centrale et du mix hydroélectrique européen	56
Tableau 9 : comparaison de la centrale et de l'eolien offshore 160 MW	58
Tableau 10 : comparaison de la centrale avec la production photovoltaïque (Greendelta, n.d.)	59
Tableau 11 : comparaison avec la production électrique au charbon (Greendelta, n.d.)	60
Tableau 12 : comparaison avec la production d'électricité nucléaire (Greendelta, n.d.)	61
Tableau 11 : tableau reprenant l'impact de la passe à poisson de Chaudfontaine (les indicateurs ne sont pas ramenés à l'unité fonctionnelle).....	66
Tableau 12 : revenus annuels de la centrale de Chaudfontaine (Cozannet, 2016a)	69

Table des figures

Figure 1: Représentation systémique d'une ACV selon ISO 14040(afnor, 2006).....	13
Figure 2 Schéma de réalisation de la phase d'évaluation de l'inventaire du cycle de vie. (Hydro- Québec, 2013)	18
Figure 3 : vis hydrodynamique et ses paramètres(Casasola et al., 2015).....	22
Figure 4 : Frontières du système	26
Figure 5: Catégories d'impacts prise en compte par la méthode CML baseline. (Benini et al., 2014) .	29
Figure 6 Catégorie d'impact de la méthode "Cumulative energy demand". (Benini et al., 2014).....	30
Figure 7 : Catégories d'impacts pour la méthode ReCiPe.(Benini et al., 2014).....	31
Figure 8: Schéma général de traitement des données.	34
Figure 9 communication avec l'entreprise WEG	34

Figure 10 : Règle d'extrapolation issues de la PEP du convecteur.....	35
Figure 11 : mode de production d'électricité du mix énergétique européen. (eurostat, 2016).....	54
Figure 12 : donnée d'inventaire du mix éolien européen (Greendelta, n.d.)	57
Figure 13 : centrale de Monceau levée (Rutten, 2017)	Figure 14 : centrale de
Monceau abaissée.....	65
Figure 15 : part de revenu annuel de la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine.....	69

Liste des abréviations

ACV	Analyse du cycle de vie
DI	Divers
EM	Electromécanique
EMSD	Electromécanique soudure Diffels
EROI	Energy return on invested
FDES	Fiche de déclaration environnementale et sanitaire
FE	Ferronnerie
GC	Génie civil
GWh	Giga watt heure
ISO	International organisation for standardisation
kW	Kilo watt
kWh	Kilo watt heure
MTBE	Mérytherme bureau d'étude
MW	Méga watt
MWh	Méga watt heure
PEP	Profil environnemental de produit
TU	Turbinage
UF	Unité fonctionnelle

Introduction

L'origine de l'utilisation de l'énergie hydraulique est un sujet historique encore flou, toutefois, les historiens s'accordent sur une date approximative du III^{ème} siècle avant Jésus Christ (König, 2015). A cette époque, l'énergie était conservée sous sa forme mécanique pour actionner les meules des moulins à blé. Cette utilisation de l'énergie hydraulique fut conservée jusqu'à l'avènement de l'électricité. A l'heure d'aujourd'hui, la production énergétique se tourne majoritairement vers l'électricité avec une part de transformation de 78 % (ALCEN, 2015). Avec une production journalière de 10 037 GWh en 2012, il s'agit de la première source de d'énergie renouvelable dans le monde (ALCEN, 2015). Le développement de l'hydroélectricité est lié d'une part aux avantages qui lui incombent, en effet, l'hydroélectricité est reconnue comme une énergie renouvelable répondant particulièrement bien aux besoins énergétiques de la société en terme de disponibilité. D'autres part, étant une énergie renouvelable, elle fait partie du panel de solutions pour la réponse au déficit énergétique qui se présente au XXI^{ème} siècle. Un des principaux challenges imposés par la société est d'assurer une disponibilité énergétique pour répondre aux besoins en tout instant. Pour maîtriser la production d'énergie renouvelable, il est nécessaire de pouvoir maîtriser la source de cette énergie. Si ces éléments n'ont pas été maîtrisés pour l'énergie solaire et éolienne, la construction des barrages hydroélectriques permet de contrôler la production et donc l'offre en fonction de la demande énergétique. Le problème du contrôle de l'approvisionnement est tel que le stockage de l'énergie est un enjeu majeur pour l'indépendance future de la société par rapport aux énergies fossiles. Dans ce contexte, l'énergie potentielle gravifique de l'eau est encore utilisée comme solution d'adaptation de l'offre par rapport à la demande. En pompant de l'eau vers un bassin situé en amont lorsque l'offre dépasse la demande et en la turbinant vers un bassin aval lorsque la demande est supérieure, on utilise l'énergie potentielle gravifique comme moyen de stockage de l'énergie et ensuite l'hydroélectricité comme moyen de valorisation. Si les stations de pompage turbinage permettent donc d'utiliser les surplus d'énergie, les barrages quant à eux permettent d'adapter l'offre en maîtrisant le passage de l'eau dans les turbines. Avec ces caractéristiques de production, les retenues d'eau pour la production électrique sont positives, ce n'est toutefois pas toujours le cas au niveau local. En effet, les barrages sont soumis à controverse pour le respect des populations locales. La consommation d'espace pour le stockage de l'eau peut mener à l'expulsion des populations locales comme pour la construction du barrage de Tignes en France, au bouleversement des équilibres écologiques, à une perte de biodiversité. De plus, les énormes retenues d'eau représentent un risque d'inondation en cas de rupture du barrage comme ce fut le cas à Fréjus en 1973. Heureusement, la production d'hydroélectricité n'est pas automatiquement liée à ces problématiques. En effet, les centrales hydroélectriques installées au fil de l'eau ne nécessitent pas de retenir de grandes quantités d'eau. En utilisant la pente des rivières, elles ne nécessitent pas de retenues d'eau. Il est toutefois plus difficile de maîtriser la production par ces centrales étant donné qu'elles sont tributaires des débits et donc des conditions pluviométriques. Il est toutefois intéressant de donner le taux de fonctionnement qui avoisine les 6000 heures par an. Ce taux de charge représente par rapport à l'éolien et au solaire un avantage considérable pour la coordination de l'offre et de la demande énergétique

Si l'hydroélectricité fait le plus souvent références aux grosses centrales dont la puissance dépasse la centaine de mégawatts, tel que les barrages alpins et les énormes centrales comme le barrage des Trois Gorges en Chine, un potentiel d'exploitation est bien présent pour des plus petites centrales. En Belgique, la production d'hydroélectricité par les minis centrales de moins de 200 kW représente un tiers du total hydroélectrique, soit l'équivalent de la consommation de 40 000 ménages (EDORA asbl, 2013).

MTBE s.a. a fait de ce domaine d'activité sa spécialité en tant que bureau d'étude. Les centrales hydroélectriques installées par MTBE s.a. vont d'une puissance de 12 à 600 kW. Les deux personnes à l'origine de MTBE s.a. se sont orientées vers l'énergie renouvelable en raison de leurs convictions environnementales, économiques et sociales. Les activités du bureau d'étude englobent donc ces trois pôles de réflexion dans son activité quotidienne. Ces réflexions se traduisent donc par des études économiques de rentabilité des projets, hydraulique de productibilité énergétique et environnementales d'impact.

L'intégration du point de vue environnemental dans les activités de la société se faisant principalement à une échelle locale, le point de vue environnemental à l'échelle globale n'avait jusqu'alors pas encore été évalué. Au cours de l'année 2015, MTBE s.a. a remporté un marché public pour l'installation d'une centrale hydroélectrique dans la commune de Schœnau (Cozannet, 2016b). En plus des études habituelles inhérentes à la réalisation du projet, il fut commandé au bureau d'étude une analyse du cycle de vie de la centrale qui allait être installée. La première estimation du temps de travail nécessaire à la réalisation de cette étude était de 80 heures. Il est vite apparu aux yeux de l'équipe que cette durée ne serait pas suffisante et que l'écart entre le temps estimé et le temps réel était colossal. A partir de ce moment l'analyse du cycle de vie fut mise entre parenthèses. A la même période, commençait au sein de MTBE s.a. le montage du dossier pour l'obtention de la certification ISO 9001 traitant du management de la qualité. La normalisation des méthodes de travail commençait donc à s'insérer au sein du bureau d'étude.

L'intérêt de MTBE s.a. pour cette étude se situe dans les possibilités de positionnement de son activité dans le secteur des énergies en tant que PME. En comparant un de ses travaux à d'autres moyens de productions d'électricité sur une base de travail reconnue, le bureau d'études peut s'insérer dans le contexte énergétique de la région géographique sur laquelle il répand son activité. Lorsque l'analyse du cycle de vie de la centrale sera réalisée, celle-ci pourra ou non en fonction des résultats être utilisée comme argument écologique dans la vente de projets. Dans la sphère décisionnaire d'un organisme publique, en tant qu'outil d'aide à la décision, l'analyse réalisée pourrait intervenir dans l'élaboration d'une politique énergétique et environnementale.

C'est suite à ces intérêts que MTBE s.a. a commandé l'analyse du cycle de vie de la centrale qu'elle a installée à Chaudfontaine. Les objectifs annoncés de cette analyse du cycle de vie étaient de réaliser un travail dont la représentativité permettrait d'utiliser ce travail dans une démarche commerciale. Il fallait donc avoir une méthode de travail suffisamment claire et reconnue pour que la communication autour de cet aspect du travail du bureau d'étude soit basée sur des éléments solides. Etant initié à la normalisation via les normes ISO, la méthodologie choisie fut celle des normes ISO 14040 et 14044 ; la norme ISO 14044 étant un complément à la norme ISO 14040. Si la méthodologie fut un aspect primordial de l'analyse, la représentativité de la centrale sur laquelle l'analyse allait être portée fut également un élément central. Il fallait donc trouver la centrale type ou moyenne qui possédait la meilleure représentativité par rapport à l'activité de MTBE s.a. La centrale de Chaudfontaine installée sur le barrage Bacquelaine (Cozannet, 2016a) possède cette caractéristique. De plus, celui-ci possède deux avantages, à savoir une proximité géographique avec le lieu de réalisation de l'étude et une proximité professionnelle avec le maître d'ouvrage de cette centrale. La proximité géographique a facilité les visites pour l'observation de terrain et la proximité professionnelle a facilité les échanges d'informations concernant le contexte de la centrale.

Cette méthodologie se servant des flux inhérents à l'ensemble du cycle de vie comme données de base pour analyser l'impact environnemental du cycle de vie de la centrale, les démarches à effectuer pour réaliser ce travail englobaient donc la majorité des aspects liés à la réalisation de projet. Sur base de ce constat, il était impératif que la réalisation de ce travail se déroule au sein même du

bureau d'études MTBE s.a. De cette manière, l'apport des avis des experts qui se plaçaient en maître d'œuvre fut continu et indispensable.

Toutefois, les avis des membres de l'équipe du bureau d'étude ne furent pas l'unique source d'informations. Un contact avec l'ensemble des partenaires étant intervenus dans la réalisation de la centrale fut établi pour obtenir les données d'inventaire nécessaire à l'analyse du cycle de vie. Toutefois, l'analyse du cycle n'étant pas un processus auquel chaque partenaire est initié, ces données d'inventaire ne furent pas toujours obtenues. Les ressources disponibles sur internet furent donc utilisées pour pallier le manque d'information.

1. Bibliographie

1.1. Qu'est-ce qu'une ACV

L'ACV (analyse du cycle de vie) est une méthode d'analyse de l'impact d'un produit sur l'environnement. Le terme produit reprend un bien, un service ou un procédé (Jolliet, Saadé, Crettaz, & Shaked, 2010). L'approche possède un caractère complet quant au cycle de vie car elle intervient « du berceau à la tombe » (Jolliet et al., 2010). Ainsi les impacts sur l'environnement du produit sont étudiés tout au long de son cycle de vie. Le cycle de vie commence à l'extraction des matières premières nécessaires à la production du produit jusqu'à son démantèlement et son recyclage. Entre l'extraction des matières premières et le recyclage, il y a les étapes de production, de mise en œuvre et de vie en œuvre.

Analyser un produit tout au long de son cycle de vie nécessite de considérer la vie du produit comme un système. Pour établir ce système, il faut définir ses limites, ses intrants et ses extrants. La définition des limites permet de confiner clairement l'étendue de l'analyse et de déterminer les éléments qui seront pris en compte (Hydro-Québec, 2013). Les intrants seront définis par rapport aux limites préalablement établies, il s'agit en fait d'identifier des flux nécessaires durant chaque étape du cycle de vie du produit. Les extrants seront les flux rejetés dans l'environnement, c'est-à-dire dans les écosystèmes aquatiques, terrestres et dans l'atmosphère. Les flux représentent généralement de la matière, de l'énergie ou des déchets (Jolliet et al., 2010). La méthodologie utilisée pour définir le système possède un caractère itératif. En effet, les avancées dans le travail et les résultats obtenus nécessitent la plupart du temps d'effectuer des modifications dans les étapes précédentes pour donner au travail une cohérence suffisante. Suivant ce principe, la définition du champ et des objectifs est une étape souvent soumise à modification (afnor, 2006).

L'analyse du cycle de vie d'un produit permet d'évaluer son impact par rapport à l'environnement. Le fait d'avoir évalué le produit de manière approfondie va permettre de pouvoir le comparer à d'autres produits. En vue de renforcer la crédibilité de la comparaison entre deux produits différents, il est important de se baser sur des ACV ayant suivi une méthode d'élaboration similaire. C'est dans cette optique que les normes ISO 14 040 ont été mises au point (Jolliet et al., 2010). En possédant une portée internationale, ces normes permettent d'étendre l'application et l'utilité qui peut être retirée d'une ACV. La figure suivante représente un résumé de la réalisation d'une ACV sous forme de système.

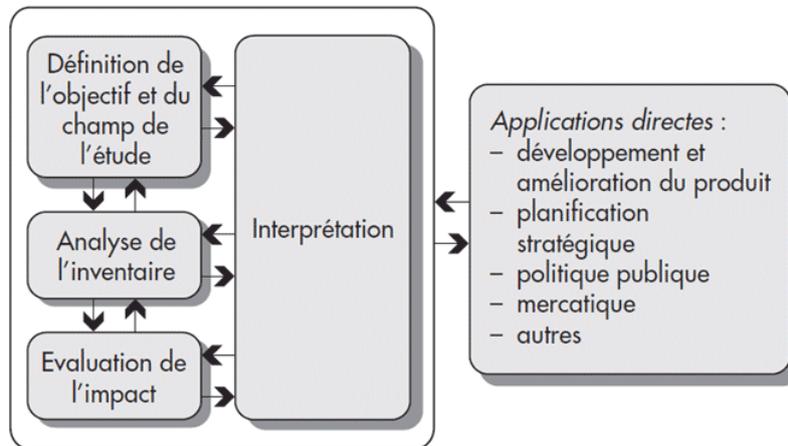


Figure 1: Représentation systémique d'une ACV selon ISO 14040(afnor, 2006).

L'étape suivant la comparaison est l'optimisation d'un procédé par le choix des produits qui vont être utilisés, choix qui sera basé sur les résultats obtenus lors des ACV et les conclusions et recommandations qui pourront en être retirées.

1.2. Pourquoi réaliser une ACV

L'analyse du cycle de vie consiste en un outil d'aide à décision qui sera réalisé en fonction des applications prévues (afnor, 2006). La définition du cadre de l'étude doit permettre de remplir ces applications. Celles-ci peuvent concerner les domaines de l'écoconception, de la politique, de l'industrie, etc. L'analyse du cycle de vie étant une étude se portant soit sur un produit soit sur un service, il s'agit d'évaluer l'impact environnemental de la réponse à un besoin. Le but général d'une analyse du cycle de vie est donc de comparer les différents moyens de réponses à ce besoin afin d'en minimiser les conséquences sur l'environnement. Toutefois, ces aspects font appel à des analyses multicritères, car il n'existe pas de critère universel permettant de comparer les impacts pour l'ensemble des produits. Il conviendra dès lors d'utiliser et éventuellement de hiérarchiser les critères pour tenter de comparer ou d'associer les ACV de différents produits ou service. La décision intègre également une volonté de favoriser tel ou tel aspect de l'environnement.

Prenons par exemple, deux engrais azotés qui ont fait l'objet d'une analyse de leur cycle de vie respectif. Sur base de ces deux analyses un choix entre les deux produits doit être fait pour être appliqué à une parcelle agricole. Dans notre cas, l'engrais A présente des rejets en nitrate dans les nappes aquifères plus importants (impact important sur l'eutrophisation des eaux souterraines) que l'engrais B tandis que l'engrais B possède une toxicité pour une certaine espèce d'oiseaux (important impact sur l'écotoxicité). Ensuite, dans ce même contexte, deux parcelles pour la plantation sont disponibles : Une parcelle 1, qui se situe au-dessus d'une nappe aquifère utilisée pour l'approvisionnement en eau potable et dont la concentration en nitrate est proche de la limite fixée par l'OMS, et une parcelle 2 qui se situe sur la route migratoire de l'espèce d'oiseaux précédemment cité.

Le choix entre les deux engrais sera donc guidé par les besoins de protection de l'environnement. Pour la parcelle 1, on choisira l'engrais B pour limiter la contamination de la nappe par les nitrates. Pour la parcelle 2, on choisira l'engrais A pour préserver l'espèce d'oiseaux migrateurs. Il n'y a pas de « meilleure » ou de « plus mauvais » engrais. Seul l'intégration des résultats dans un contexte global et multicritère offre la possibilité d'utiliser les résultats à bon escient.

Dans cet exemple, les besoins de l'environnement sont mis en avant ainsi que l'utilité de connaître les flux qui concernent le produit pour répondre à une problématique environnementale. Enfin, sur base de la connaissance de ces paramètres, une décision a été prise et selon les scénarios envisagés, la réponse est différente.

Dans l'exemple considéré, seuls deux impacts environnementaux furent pris en compte. Toutefois, les ACV visent un impact beaucoup plus global des nuisances potentielles pour l'environnement (Boeglin & Veuillet, 2005). De plus, en recensant les flux énergétiques du système, l'ACV permet d'affiner l'évaluation de la performance énergétique et climatique d'un produit. Cette évaluation possède une pertinence marquée pour les systèmes de production d'énergie renouvelable. Concrètement, le temps de retour énergétique est la durée nécessaire pour qu'une installation produise une quantité d'énergie équivalente à l'énergie nécessaire pour la production d'une installation. Si par exemple, une éolienne nécessite 40 MWh pour sa production et que chaque mois, elle produit 10 MWh, alors son temps de retour énergétique sera de quatre mois. L'ordre de grandeur donné ici est réaliste (Andre, 2016). La performance climatique est évaluée selon les rejets durant la production, la construction, l'exploitation et le recyclage de l'installation et les rejets évités par la production d'électricité « verte ».

Si une des grandes solutions pour nous mener à un développement de plus en plus durable est d'adopter un mode de vie plus respectueux en modifiant notre manière de consommer, le second grand principe est de diminuer la consommation. L'information environnementale prodiguée par les analyses du cycle de vie au travers des catégories de dommage peut être la base d'une réflexion sur la réelle nécessité de consommation du produit étudié.

1.3. Comment réaliser une ACV

Selon les normes internationales ISO de la série 14 000, une ACV comporte quatre étapes.

1.3.1. Définition des objectifs et du champ :

Cette étape va permettre de définir la direction dans laquelle l'analyse devra être menée et de poser le problème environnemental (Jolliet et al., 2010).

Ces objectifs vont donc dépendre de la problématique qui est à la base de l'analyse. Les éléments que doit contenir la définition des objectifs sont posés par la norme ISO 14040. Ces éléments sont :

- ✓ L'application envisagée ;
- ✓ Les raisons de la réalisation de l'étude ;
- ✓ Les personnes auxquelles il est envisagé de communiquer les résultats ;
- ✓ L'utilisation des résultats pour des informations comparatives destinées à être divulguées au public (afnor, 2006).

Le champ de l'ACV est la base qui permet de disposer des éléments suffisants pour répondre aux objectifs posés préalablement (afnor, 2006). Il est donc nécessaire que le champ soit compatible avec les objectifs. Ces éléments sont repris dans la norme ISO 14040 :

- ✓ Le système de produit à étudier ;
- ✓ Les fonctions du système de produit ou des systèmes dans le cas d'une étude comparative ;
- ✓ L'unité fonctionnelle ;
- ✓ La frontière du système ;

- ✓ Les règles d'affectation ;
- ✓ La méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impact ;
- ✓ L'interprétation à utiliser ;
- ✓ Les hypothèses ;
- ✓ Les choix de valeurs et les éléments facultatifs ;
- ✓ Les limitations ;
- ✓ Les exigences de qualité des données ;
- ✓ Le type de revue critique, le cas échéant ;
- ✓ Le type et le format du rapport spécifié pour l'étude. » (afnor, 2006).

Une ACV étant un processus itératif, il faut noter que la définition du champ peut varier en fonction des informations qui sont recueillies au cours des étapes suivantes (Jolliet et al., 2010).

Dans cette première étape, trois éléments possèdent une importance capitale pour l'élaboration d'une ACV. Ces éléments sont capitaux car ils vont fortement influencer les étapes suivantes. Il s'agit de la fonction du système, de l'unité fonctionnelle et de la frontière du système étudié.

- ✓ La fonction du système : l'ACV étant un outil d'aide à la décision entre deux produits, il est nécessaire que les deux produits bien que différents, remplissent une même fonction. Si le choix sur tel ou tel produit se pose, c'est qu'une ou plusieurs fonctions doivent être remplies. La ou les fonctions seront donc le premier élément permettant de juger de la pertinence de la comparaison entre les deux produits. De plus, il faut distinguer et prendre en compte les fonctions principales et secondaires. Si une fonction principale est similaire pour deux produits et que les fonctions secondaires sont différentes, ces deux produits seront difficilement comparables. Si par exemple, des gobelets jetables et des verres en cristaux sont pris en considération, leur fonction de base est de contenir de la boisson avant ingestion. Toutefois, en tant que fonction secondaire le verre en cristal doit adhérer à un certain standing tandis que le gobelet jetable doit remplir une fonction de facilité à l'emploi grâce à l'absence de nettoyage. Ces deux produits ne sont donc pas comparables sur base de leurs ACV respectives.
- ✓ L'unité fonctionnelle (UF) : la norme ISO 14 040 la définit comme « la performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie » (afnor, 2006). Celle-ci est donc définie selon la fonction du système. Elle doit permettre de quantifier la fonction principale du système, c'est-à-dire qu'elle va servir de référence pour la caractérisation et la quantification de tous les flux qui vont intervenir dans le système du produit. Si par exemple, un isolant est analysé, l'UF sera une unité de superficie (généralement 1 m²). Dans l'approche comparative entre deux produits, elle constitue aussi un élément clé. En effet, une comparaison entre deux produits sur base de leur ACV n'est pertinente que si l'unité fonctionnelle est identique. Par exemple, si deux types de vitrage (A et B) différents ont été analysés sur leur cycle de vie. L'analyse du vitrage A a une unité fonctionnelle de 10 m² et celle du vitrage B a une unité fonctionnelle est de 1 m², les flux seront plus importants pour l'UF de 10 m². Toutefois, la différence entre les quantités de flux ne signifie pas que le type de vitrage A aura un plus grand impact que le vitrage B. Pour rendre la comparaison de ces deux vitrages possibles, il faut appliquer un facteur de correction aux flux d'un des deux vitrages pour avoir des UF identiques. Dans cet exemple ci, il s'agirait soit de multiplier les flux du vitrage A par 0,1 soit de multiplier les flux du vitrage B par 10. La notion de durée est aussi importante pour l'UF. En effet, il est intéressant de connaître la durée de vie du produit analysé, la durée de vie étant la durée pendant laquelle le produit va

pouvoir remplir sa fonction. Lors de la comparaison de deux produits, il faudra appliquer un facteur de correction aux produits pour rendre les flux pris en compte comparables. Prenons deux tracteurs différents, le tracteur A dont la durée de vie est de 2000 heures et le tracteur B dont la durée de vie est de 4000 heures. Si l'UF défini pour une durée de 1000 heures, il faudra un demi tracteur A et un quart de tracteur B. Les flux devront donc être divisés par deux pour le tracteur A et par quatre pour le tracteur B.

- ✓ La frontière du système étudié : la norme ISO 14 040 définit la frontière d'un système comme « *La frontière du système détermine les processus élémentaires qui doivent figurer dans l'étude d'ACV. Le choix de la frontière du système doit être cohérent avec les objectifs de l'étude. Les critères utilisés dans l'établissement de la frontière du système doivent être identifiés et expliqués.* » (afnor, 2006). La frontière du système est l'étape où de nombreux choix devront être effectués. Ces choix concernent les flux ainsi que les intrants et les extrants pris en compte, l'omission possible d'une étape du cycle de vie, les processus élémentaires à inclure et le niveau de détail considéré. Chacun de ces choix doit être expliqués et motivés dans l'ACV. Toutefois, certaines règles existent pour guider et limiter le niveau de liberté qu'il est possible de prendre dans une ACV. Par exemple, « *la suppression d'étapes du cycle de vie, de processus, ou d'intrants ou d'extrants est permise uniquement si elle ne change pas significativement les conclusions générales de l'étude.* » (afnor, 2006).

Les autres éléments que doit contenir la définition des objectifs et du champ seront décrits dans la section matériel et méthode.

1.3.2. Inventaire des émissions et des extractions

Cette phase consiste en une description quantitative des flux de matière, d'énergie et de polluants intervenant dans le système préalablement défini (Jolliet et al., 2010). Cette description consiste en une classification des données selon plusieurs critères.

Pour classifier les données, il faut les recueillir. La complexité du recueil des données est liée à la complexité du système étudié. Heureusement, l'analyse du cycle de vie est un domaine d'étude qui n'en est plus à ses balbutiements. Les travaux déjà réalisés permettent de faciliter la tâche à réaliser de manière considérable. Si l'analyse du cycle favorise les données spécifiques au cas étudié, il n'est pas pensable d'en réaliser une sans utiliser des données normalisées pour une aire géographique et une durée déterminée. Les travaux disponibles au préalable permettent donc de réaliser des études plus simplement. Toutefois, toutes les données ne sont pas gratuites. Les bases de données les plus abouties et les plus récentes ne sont malheureusement pas accessibles pour tout le monde. Les licences pour une base de données telle que « Ecoinvent version 3 » qui fait figure de référence sur le marché s'élève à un montant de l'ordre du millier d'euros. Des bases de données gratuites existent, celles-ci sont toutefois moins complètes. Certains fabricants publient également des FDES (Fiche de description environnemental et sanitaire) qui présente les résultats d'analyse du cycle de vie d'un produit de construction (INIES, n.d.-b) et des PEP (Profil Environnemental d'un Produit) qui présentent les résultats de l'analyse du cycle de vie des produits d'équipement électrique, électronique et de génie climatique (INIES, n.d.-a). Ces fiches contiennent une synthèse de l'analyse environnementale d'un produit depuis la description du produit jusqu'à l'analyse de l'impact. Dans ces fiches, sont exclues la caractérisation des impacts en catégories de dommages et les interprétations continues qui doivent intervenir dans chaque étape de l'ACV. L'encadrement législatif de ces fiches est prévu selon chaque pays. En France, ces fiches sont encadrées par la norme NF 10-010 pour les FDES et par la norme XPC-08-100-1 pour les PEP (INIES, n.d.-a, n.d.-b). En Belgique, les déclarations environnementales sont encadrées par la norme NBN EN 15804+A1 (Wastiels, 2015). Lorsque l'on a recours à ces fiches,

l'inventaire ne représente plus uniquement des flux mais plutôt dans le cas présent un inventaire de produits.

1.3.2.1. Validation des données

Les données utilisées pour analyser le cycle de vie peuvent être étroitement corrélées. C'est le cas pour les données d'inventaire de flux de CO₂ et pour les données d'inventaire de consommation d'énergies non renouvelables. Ces données sont liées par le processus de consommation de l'énergie non renouvelable. En effet, l'utilisation la plus commune de l'énergie non renouvelable est la combustion. Suite à cette combustion, du CO₂ est rejeté. La quantité de ce gaz est donc liée à la quantité d'énergie primaire utilisée. En comparant ces deux impacts à un autre processus dont les données d'inventaire ont elles aussi été validées, il est possible de vérifier la cohérence des données. Si la quantité d'énergie primaire non renouvelable est supérieure pour le produit A par rapport au produit B, alors la quantité de CO₂ utilisé comme indicateur doit également l'être. La méthode d'analyse du cycle de vie selon la norme ISO 14040 recommande d'effectuer ces deux bilans à la main de manière à vérifier la cohérence des données recueillies.

1.3.2.2. Rattachement des données au processus élémentaire et à l'unité fonctionnelle

L'ensemble des données recueillies doit être adapté aux flux de référence qui sont définis comme les flux nécessaires pour remplir la fonction du produit étudié selon la description qui en est faite dans l'unité fonctionnelle. L'agrégation des résultats liés à cette étape ne peut se faire que lorsque les données sont rattachées à des substances équivalentes ou alors lorsqu'elles ont un impact environnemental similaire.

1.3.2.3. Affinage de la frontière du système

Lorsque l'inventaire des flux est réalisé, une modification des frontières du système est prévue par la norme ISO 14044. Suite à cet affinage, des processus élémentaires peuvent être introduits ou exclus des frontières du système. Les règles de modification du système doivent être préalablement décrites par des critères de coupure dans la définition du champ et des objectifs. L'appréciation de la validité d'une introduction ou d'une exclusion se fait généralement par l'analyse de la sensibilité du résultat de l'inventaire à la variation du flux ou processus considéré.

1.3.2.4. Affectation des flux aux processus élémentaires

Lorsqu'un processus élémentaire engendre plusieurs produits, intrants ou recycle des déchets en matière première, les flux pris en compte dans le processus élémentaire doivent être affectés aux différents coproduits ou co-entrants. Trois règles d'affectation sont édictées par la norme ISO 14040.

- 1) L'affectation ne doit pas se faire en divisant le processus élémentaire en sous-processus de manière à n'avoir qu'un seul produit ou entrant par sous-processus et de ne pas étendre les fonctions du système pour y inclure les coproduits.
- 2) Lors de l'affectation, les relations physiques entre les coproduits doivent être reflétées par la répartition des différents flux selon chaque coproduit, par exemple, on peut réaliser l'affectation selon les masses respectives des coproduits.
- 3) S'il n'existe pas de relation physique permettant de réaliser l'affectation, des relations d'un autre ordre peuvent être utilisées comme, par exemple, la valeur économique respective de chaque coproduit.

1.3.3. Evaluation des impacts du cycle de vie

Le but principal de cette étape est d'interpréter les résultats obtenus lors de la précédente étape. Il s'agit donc d'apporter aux centaines de données récoltées durant l'inventaire du cycle de vie

une signification environnementale. Pour communiquer l'influence des résultats obtenus lors de l'inventaire, des règles furent mise au point et ces règles permettent la compréhension de l'analyse pour un public le plus large possible. Sommairement, chaque flux inventorié est relié à un ou plusieurs impacts sur l'environnement selon son influence (par exemple, le rejet d'un kg de méthane dans l'atmosphère sera relié au réchauffement climatique étant donné qu'il s'agit d'un gaz à effet de serre) et sera quantifié au moyen d'indicateurs (par exemple, le CO₂ étant l'indicateur pour le réchauffement climatique, le pouvoir de réchauffement climatique d'un kg de méthane sera exprimé en fonction du pouvoir de réchauffement climatique du CO₂. Le méthane ayant un impact sept fois plus grand, l'expression d'un kg de méthane rejeté dans l'atmosphère sera 7 kg_{eq} CO₂).

La méthode utilisée pour évaluer l'inventaire du cycle de vie est présentée dans le schéma suivant.

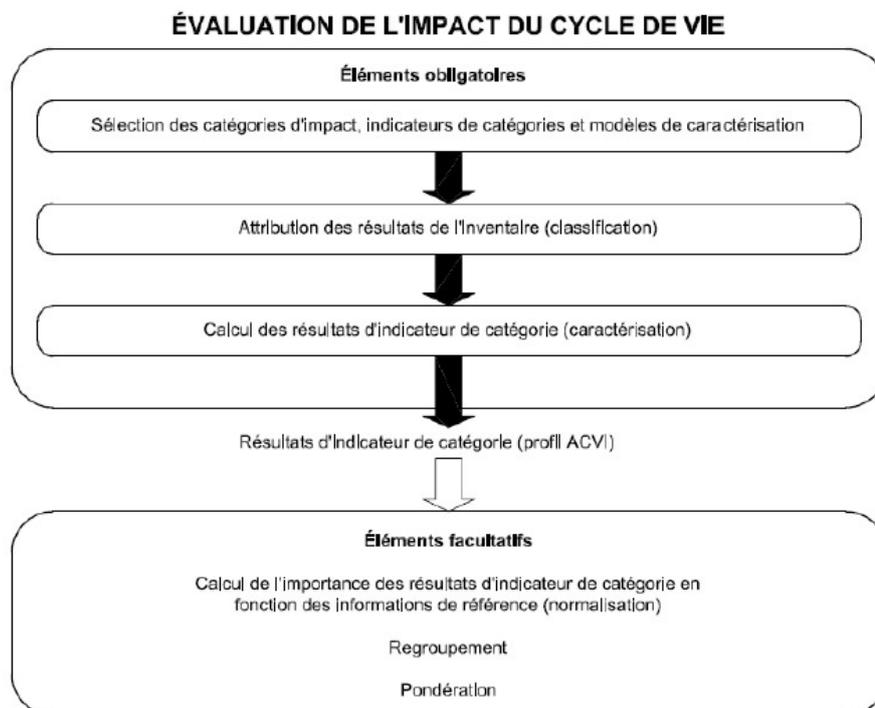


Figure 2 Schéma de réalisation de la phase d'évaluation de l'inventaire du cycle de vie. (Hydro-Québec, 2013)

Pour réaliser l'évaluation, trois étapes sont obligatoires. Suite à ces étapes, on obtient pour l'ensemble du système la valeur de chaque indicateur relié à sa catégorie d'impact.

1.3.3.1. Sélection des catégories d'impact, des modèles de caractérisation et des indicateurs de catégories

La sélection des catégories d'impact se fait selon les problématiques environnementales visées par l'analyse du cycle de vie. L'ACV vise les différentes problématiques selon les objectifs définis durant la première phase de l'ACV, à savoir la définition du champ et des objectifs.

Pour chaque catégorie d'impacts une identification par un impact final doit être réalisée. L'impact final constitue un aspect de l'environnement qui sera affecté par les flux qui y seront reliés. Ensuite, une chaîne de mécanismes doit être identifiée pour relier les flux à l'impact final. La chaîne de mécanismes doit être le fruit de recherches scientifiques sérieuses afin de relier avec le plus d'exactitude possible les flux et les impacts.

Selon les mécanismes environnementaux décrits, un modèle de caractérisation des flux doit être établi pour mettre au point des facteurs de caractérisation. Un facteur de caractérisation sera calculé pour relier un flux à un indicateur de catégories. Si un flux ne possède pas d'influence sur une catégorie d'impacts, alors le facteur de caractérisation sera nul. Si à contrario, il possède une influence, le facteur sera non nul et calculé selon l'importance de l'influence.

Comme relaté ci-dessus, le mécanisme de réchauffement climatique ayant été décrit, il a été mesuré que l'influence du méthane est sept fois supérieure à l'influence du dioxyde de carbone qui est l'indicateur de la catégorie d'impacts sur le réchauffement climatique, le facteur de caractérisation pour la relation méthane \leftrightarrow réchauffement climatique sera donc égal à sept. Les facteurs de caractérisation sont utilisés pour pouvoir exprimer les différents flux dans une même unité par catégorie d'impacts. Le fait de pouvoir exprimer des flux différents dans une même unité permet de les sommer et donc de les agréger pour simplifier les résultats et avoir une meilleure vue d'ensemble des impacts.

1.3.3.2. Attribution des résultats de l'inventaire

Lorsque les différentes catégories d'impacts sont sélectionnées et que les mécanismes environnementaux sont décrits, les flux issus de l'inventaire du cycle de vie sont attribués aux différentes catégories selon leur influence sur les différents mécanismes.

1.3.3.3. Calcul des résultats d'indicateur de catégories

Lorsque les facteurs de caractérisation sont calculés et que les flux sont attribués aux différentes catégories d'impacts, la conversion des flux dans les catégories d'impacts est réalisable. Un indicateur numérique quantifiant l'influence du flux sur l'impact est alors obtenu et celui-ci s'exprime selon l'unité de l'indicateur.

1.3.3.4. Standardisation de la méthode

Une analyse du cycle de vie étant, entre autre, un outil de comparaison, il convient que les méthodes d'évaluation de l'inventaire du cycle de vie soient standardisées afin de pouvoir comparer les différents produits sur une même base. Toutefois, une standardisation totale n'est pas possible étant donné que la méthode d'évaluation doit être adaptée à la définition de l'objectif et du champ. Il existe donc plusieurs méthodes d'évaluation et celles-ci sont reconnues internationalement pour être applicables à une large échelle. Cependant, il n'est pas valable de considérer une seule méthode d'évaluation au niveau de la planète, étant donné que certaines catégories d'impacts ont une portée à l'échelle régionale (smog photochimique, eutrophisation, acidification) ou locale (toxicité humaine, écotoxicité, utilisation des terres) (Hydro-Québec, 2013). La norme ISO 14044 a édité plusieurs règles concernant le choix des méthodes.

- ✓ « Les catégories d'impacts, les indicateurs de catégorie et les modèles de caractérisation soient acceptés à l'échelle internationale, c'est-à-dire qu'ils soient basés sur un accord international ou approuvés par un organisme international compétent ;
- ✓ Le choix des catégories d'impacts reflète un ensemble complet de points environnementaux en rapport avec le système de produits étudié, tout en tenant compte de l'objectif et du champ de l'étude ;
- ✓ Le modèle de caractérisation pour chaque indicateur de catégorie soit scientifiquement et techniquement valable, et fondé sur un mécanisme environnemental distinct, identifiable et/ou une observation empirique reproductible ;
- ✓ Les choix de valeurs et les hypothèses faites lors du choix des catégories d'impacts, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation soient minimisés »

(Afnor, 2006)

1.3.4. Interprétation du cycle de vie

Cette phase d'interprétation qui englobe les trois phases précédentes, a pour but de fournir des recommandations en se basant sur les résultats obtenus précédemment, d'analyser les résultats de manière transparente en respectant les exigences décrites dans l'objectif et le champ de l'étude, d'établir des conclusions et d'expliquer les limites de l'étude (Afnor, 2006).

Le contenu de la phase d'interprétation peut se résumer en trois points :

- ✓ « *L'identification des points significatifs à partir des résultats des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation des impacts en liaison avec les objectifs et le champ de l'étude ;*
- ✓ *La vérification, qui prend en compte les contrôles de complétude, de sensibilité et de cohérence ;*
- ✓ *Les conclusions, les recommandations et les limitations. » (Afnor, 2006)*

Le premier point désigne la mise en évidence des éléments cruciaux du cycle de vie du produit ou hotspot. Ce point est intéressant dans la mesure où l'ACV possède des objectifs d'amélioration du produit. Il doit donc être plus ou moins développé selon les objectifs préalablement définis.

La vérification sert à éclairer le ou les lecteurs sur la confiance qu'ils peuvent accorder aux résultats obtenus. Il s'agit en fait d'une évaluation de leur fiabilité selon trois méthodes de contrôle.

- ✓ Contrôle de complétude : Il s'agit de s'assurer que tous les points importants et pertinents sont présents et complets dans l'étude.
- ✓ Contrôle de sensibilité : La fiabilité des résultats et des conclusions est testée par une détermination des incertitudes dans les données et les divers choix méthodologiques.
- ✓ Contrôle de cohérence : Il faut vérifier le lien entre d'une part les choix effectués durant l'analyse et la méthodologie appliquée et, d'autre part, la définition du champ et des objectifs.

Enfin, le dernier point de l'interprétation aura pour but d'éclairer les futurs lecteurs en tirant des conclusions, en identifiant les limitations et en réalisant des recommandations sur l'étude.

1.4. La centrale hydroélectrique à vis d'Archimède

Les origines de la vis d'Archimède sont controversées, si une partie des historiens attribue cette invention à Archimède comme l'indique son nom, une autre partie attribue cette invention à Sennachérib, souverain Assyrien qui succéda à son père en 705 avant JC (Antikforever, n.d.). Sennachérib œuvra pour la construction de la ville de Ninive afin d'en faire sa capitale. En tant que ville de prestige, Sennachérib fit bâtir des jardins qui seraient à l'origine du mythe des jardins suspendus de Sémiramis (Antikforever, n.d.). La mise en place de ces jardins nécessita une irrigation régulière et donc un approvisionnement constant en eau. Outre les canaux d'amenée, des vis sans fin auraient été installées pour pomper de l'eau (Antikforever, n.d.).

La seconde origine de la vis sans fin se situe entre 285 et 212 avant JC période durant laquelle vivait Archimède. L'invention de la vis d'Archimède serait due au passage, dans un village d'un créateur qui voulait aider les habitants à pomper de l'eau en amont (ouest fixation, 1978). Cette vis est encore utilisée aujourd'hui pour le pompage ou le turbinage.

Fonctionnant sur le même principe, le pompage et le turbinage sont deux procédés inverses. Le premier consomme de l'énergie pour faire monter un fluide, tandis que le second fait descendre un fluide pour produire de l'énergie.

Si aujourd'hui, MTBE s.a. propose à ses clients d'installer des vis d'Archimède, c'est que celles-ci possèdent de nombreux avantages et sont particulièrement adaptées aux chutes d'eau de faibles hauteurs (Spaans Babcock, 2015). Parmi les avantages, on peut citer :

- ✓ Une fiabilité élevée des matériaux qui est rendue possible grâce à la simplicité du principe et à la faible vitesse de rotation de la vis et donc la réduction des contraintes imposées aux matériaux (Spaans Babcock, 2015).
- ✓ Un rendement de la vis élevé qui peut atteindre les 95% (Spaans Babcock, 2015) malgré de fortes variations de débit (Spaans Babcock, 2015).
- ✓ Une préservation de la faune halieutique est assurée par l'adaptation des vis. Suite à plusieurs études traitant l'impact des vis sur les poissons, les critères d'adaptation des vis ont été définis. Il s'agit d'appliquer une faible vitesse de rotation de la vis, une distance minimale entre l'extrémité du pas de vis et l'auge (trois à cinq mm), un bumper incompressible sur la tranche de la pale d'entrée et un fonctionnement en bac à pression atmosphérique piégeant le poisson durant la descente évitant ainsi les effets de cavitations et de changement hydraulique (Burton, 2014).
- ✓ Un dégrillage grossier permettant de minimiser les pertes de charges. L'Architecture de la vis permettant le passage de corps de taille important, l'entrefer des grilles (de l'ordre de deux à quinze cm) peut être plus large que pour la plupart des autres technologies (Burton, 2017).
- ✓ Compatible pour un large panel de hauteur de chute d'un à douze mètres. De plus, la possibilité d'installer les vis en série augmente cette compatibilité (Spaans Babcock, 2015).
- ✓ Compatible pour un large panel de débit (un dixième à quinze m³/s). De plus, cette compatibilité est accrue par la possibilité d'installer plusieurs vis en parallèle (Spaans Babcock, 2015).

Au vu de ces nombreux avantages, les vis d'Archimède pour la génération d'électricité sont adaptées à de nombreux sites tels que, rivières, eaux de refroidissement de centrales, eaux

industrielles de process, eaux usées en entrée de STEP, eaux traitées en sortie de STEP et réhabilitation d'anciens sites hydrauliques.

1.4.1. Principe de fonctionnement

Les premiers cas de génération d'énergie par vis sans fin, appelée dans ce cas vis hydrodynamique date de 1815 (Casasola, Weisser, Dupuis, & Aubry, 2015). La force de gravitation qui est à l'origine de l'écoulement de l'eau du niveau amont vers le niveau aval est aussi à l'origine de la rotation de la vis lorsque celle-ci se trouve dans un flux d'eau courante. En fonction de l'orientation du filet de la vis, une force résultante est induite par les forces de gravitation, les forces normales sur le ou les filets et l'aube. Cette force résultante est à l'origine du moment de force qui s'exerce sur la vis et qui est donc à l'origine de sa rotation. Ce procédé est aujourd'hui commercialisé à grande échelle depuis une vingtaine d'années.

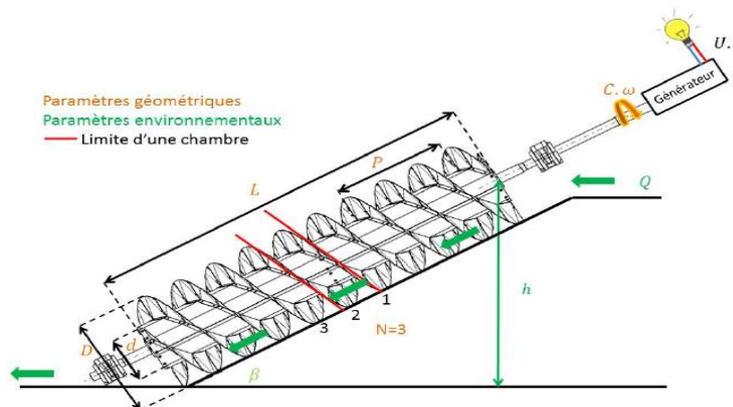


Figure 3 : vis hydrodynamique et ses paramètres (Casasola et al., 2015).

La rotation de la vis est transmise à une génératrice pour produire de l'électricité. Pour que le courant produit soit compatible avec la fréquence du réseau, une boîte de vitesse et un variateur de fréquence sont installés. La boîte de vitesse possède un rapport de multiplication unique qui augmente la vitesse de rotation en sortie de vis par un facteur de 62,54 pour atteindre le générateur (Flender Siemens, 2010). A la sortie du générateur, le variateur de fréquence diminue ou augmente la charge induite par le réseau sur l'alternateur pour optimiser la production d'électricité en faisant varier la vitesse de rotation de la vis. En effet, en fonction du débit disponible, une adaptation de la vitesse de rotation de la vis permet d'optimiser la production électrique en conservant une hauteur de chute optimale. Deux autres dispositifs de contrôle sont intégrés dans la centrale. Premièrement, le dispositif de vannage permet de réguler le débit dans le canal d'amenée de la centrale. Ce dispositif est utilisé lorsque des opérations de maintenance, de contrôle ou de test sont effectuées. Deuxièmement, le dispositif de freinage permet un arrêt total de la vis en cas de problème. Ces deux dispositifs sont actionnés par un groupe oléo-hydraulique. Enfin, au moyen de sonde et de capteur en tant que fournisseurs d'informations et de connexions avec tous ces systèmes de régulation, un automate assure leur gestion pour une production électrique optimale et une protection de la centrale.

2. Matériel et méthode

L'étude menée ici est méthodologiquement encadrée par une norme qui définit des règles précises. La raison de cet encadrement est l'utilisation pour laquelle l'étude est prévue. Premièrement, une analyse du cycle de vie est utilisée pour comparer l'influence globale des produits sur l'environnement. Afin de pouvoir comparer un produit de manière pertinente, ce produit doit être décrit de manière à pouvoir évaluer facilement cette pertinence. La première étape d'une ACV est prévue à cet effet, les règles de description dictées par les normes ISO 14040 et 14044 orientent l'étude vers son utilisation future. Il s'agit de la définition des objectifs et du champs.

2.1. Définitions des objectifs et du champ

2.1.1. Objectifs

Depuis 2010, le bureau d'étude MTBE installe des centrales hydroélectriques le long des cours d'eau en Europe et en Afrique. Après avoir contribué à la production d'une importante quantité d'électricité verte, MTBE a lancé une étude permettant d'évaluer les impacts d'une centrale sur l'environnement. En tant que technologie ayant le plus d'attrait selon l'organisme demandeur, la production d'électricité au moyen d'une vis d'Archimède reliée à un alternateur, sera l'objet de cette analyse du cycle de vie.

La méthodologie utilisée pour cette étude fut élaborée selon la norme ISO 14040 et 14044. L'utilisation de cette norme est un atout pour la pertinence et la légitimité de l'étude. Une analyse du cycle de vie d'un produit étant un outil permettant de comparer un cycle de vie d'un produit à d'autre selon l'impact environnemental, il est donc plus légitime d'utiliser une méthode normalisée. Une analyse du cycle de vie étant un processus spécifique non généralisé, il a été nécessaire de prendre un cas particulier sur lequel l'étude fut portée. Pour des raisons de représentativité et de facilité, la centrale qui sera prise en compte pour cette étude sera celle de Chaudfontaine située le long de la Vesdre sur le barrage Bacquelaine.

Le but de cette étude est donc d'élaborer un outil permettant d'informer les clients potentiels de MTBE s.a. par rapport aux impacts environnementaux d'une centrale et de ce fait, de mieux connaître le rapport cout/bénéfice net apporté par la production d'énergie verte qu'il envisage avec son projet. En effet, une comparaison des impacts environnementaux de cette centrale aux impacts des autres moyens de production d'électricité conventionnels sera réalisée. Toutefois, une valeur exacte du bénéfice environnemental net n'est pas possible. En effet, une analyse du cycle de vie est une étude qui n'est jamais totalement exhaustive. C'est d'ailleurs pour cela qu'il faut délimiter des frontières du système qui représentent le produit étudié.

La méthodologie utilisée pour l'atteinte de ces objectifs est caractérisée par la contrainte économique. En effet, aucun outil onéreux ne sera utilisé dans cette analyse. Il s'agit là aussi d'un objectif de l'étude. De cette manière, il sera possible de voir si la réalisation d'une analyse du cycle de vie d'un système d'une complexité comparable est accessible sans un investissement financier conséquent.

La mise en lumière de l'impact environnemental va permettre d'identifier les composants possédants le plus grand impact sur l'environnement. Toutefois, les décisions qui seront prises en vue d'améliorer l'impact ne concerneront pas uniquement les éléments ayant le plus fort impact. En effet, les points les plus faciles à traiter seront d'abord améliorés. De plus, en tant qu'ensemblier, le bureau d'études ne maîtrise pas les procédés de fabrications mais la sélection des sous-produits à assembler.

2.1.2. Champ

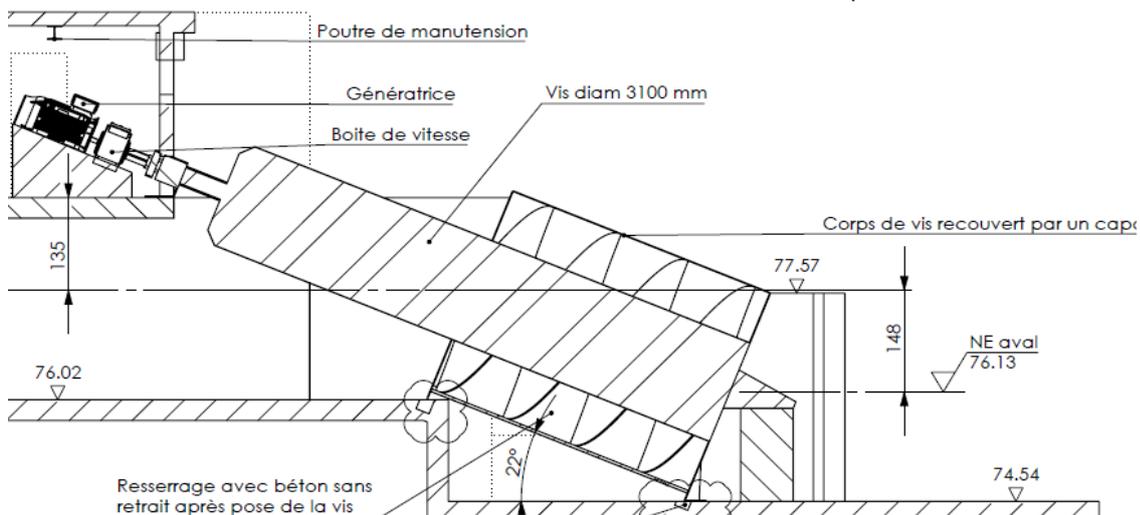
2.1.2.1. La centrale hydroélectrique sur le barrage Bacquelaine de Chaudfontaine

L'ouvrage hydroélectrique est le fruit de la collaboration de plusieurs sociétés, HydroB en tant que maître d'ouvrage, MTBE s.a. en tant que maître d'œuvre, Coca-Cola Chaudfontaine en tant qu'acheteur d'électricité et E.M.S.D, CHENE et Spaans Babcock en tant que fournisseurs.

Cette collaboration a permis de réaliser pour un investissement avoisinant les 800 000 €, une centrale hydroélectrique produisant environ 330 MWh tous les ans. Si on compare ce chiffre avec la consommation de 3765 kWh par foyer en 2010 cité par (Callmepower, 2015), on peut voir que la production d'hydroélectricité par la centrale équivaut à la consommation d'environ septante-neuf ménages. Un des grands avantages de la production d'hydroélectricité au fil de l'eau, est l'important taux de charge de la centrale, à savoir le temps de production sur une année rapporté à la durée totale d'une année, à savoir 8 760 heures. En combinant le large panel de débits pour lesquelles la centrale fonctionne et le débit relativement constant du cours d'eau, on arrive à un taux de charge de 6000h/an (Rutten, 2017). Au niveau financier, un temps de retour de 14 ans a été calculé en pré-étude (Burton, 2017).

La centrale est installée sur la Vesdre qui prend sa source sur le plateau des Hautes-Fagnes passe par la ville de Verviers et se jette dans l'Ourthe à Chênée. Son débit moyen est de 11,539 m³/s. Un débit d'équipement ou débit nominal turbinable de 5.5 m³/s et un débit réservé de 1.5 m³/s sont prévus. Une amélioration du biotope pour la faune halieutique avec l'intégration d'une passe à poisson (PAP) qui restaure la continuité écologique entre l'amont et l'aval du barrage. Le débit passant dans la PAP est de 0.5 m³/s.

Le système étudié peut se résumer en l'ensemble des éléments participant à la production d'électricité et à la régulation nécessaires à l'injection de l'électricité sur le réseau. On peut regrouper l'ensemble de ces éléments en quatre sous-ensembles :



Electro-mécanique :

- ✓ Une vis d'Archimède
- ✓ Une boîte de vitesse
- ✓ Une génératrice
- ✓ Un tableau général basse tension (TGBT)

- ✓ Un variateur de fréquence 75 kW
- ✓ Module automate
- ✓ Ecran interface

Génie civil (GC) :

- ✓ Préparation et installation chantier
- ✓ Terrassements généraux et particuliers
- ✓ Infrastructure en béton
- ✓ Local technique
- ✓ Ouvrage métallique
- ✓ Dispositif de canalisation des déchets

Ferronnerie

- ✓ Support de sonde
- ✓ Grille à large entrefer
- ✓ Pré-grille
- ✓ Caillebotis
- ✓ Garde-corps
- ✓ Vanne de garde et cadre
- ✓ Dégrilleur

Régulation et commandes

- ✓ Module de communication pour téléphone mobile et télégestion
- ✓ Groupe oléo-hydraulique
- ✓ Sonde de niveau à ultrasons
- ✓ Sonde de niveau hydrostatique

2.1.2.2. Fonctions du produit

La fonction du produit est donc de produire de l'électricité à partir de l'attraction gravifique agissant sur l'eau de la Vesdre au niveau du barrage Bacquelaine.

La Vesdre étant un biotope abritant une biodiversité variée, la centrale fut conçue de manière à ne pas rompre ce biotope. Il a donc fallu assurer la continuité écologique entre l'amont et l'aval du site. Pour assurer cette fonction, une passe à poisson fut construite.

2.1.2.3. Unité fonctionnelle

La centrale hydroélectrique de Chaudfontaine sera évaluée sur base de un kilowatt heure comme unité fonctionnelle avec une durée de fonctionnement estimée à trente ans. La production d'électricité prévue sur ce projet est de 330 MWh/an (Cozannet, 2016a) sur l'ensemble du cycle de vie, la production sera donc de 9 900 000 kWh. Un facteur de 1/9 900 000 devra donc être utilisé pour se référencer à l'unité fonctionnelle. En effet, les impacts inventoriés pour l'ensemble du cycle de vie devront donc être multipliés par le facteur 1/9 900 000 afin qu'ils soient représentatifs de la production d'un kWh par la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine.

2.1.2.4. Frontières du système

La délimitation générale du système est représentée dans la figure suivante. Le système présenté dans la figure comprend plusieurs éléments et procédés pris en compte dans l'analyse du cycle de vie. L'analyse englobe l'approvisionnement en matériaux et en énergie, le cycle de vie du produit et les émissions à l'environnement.

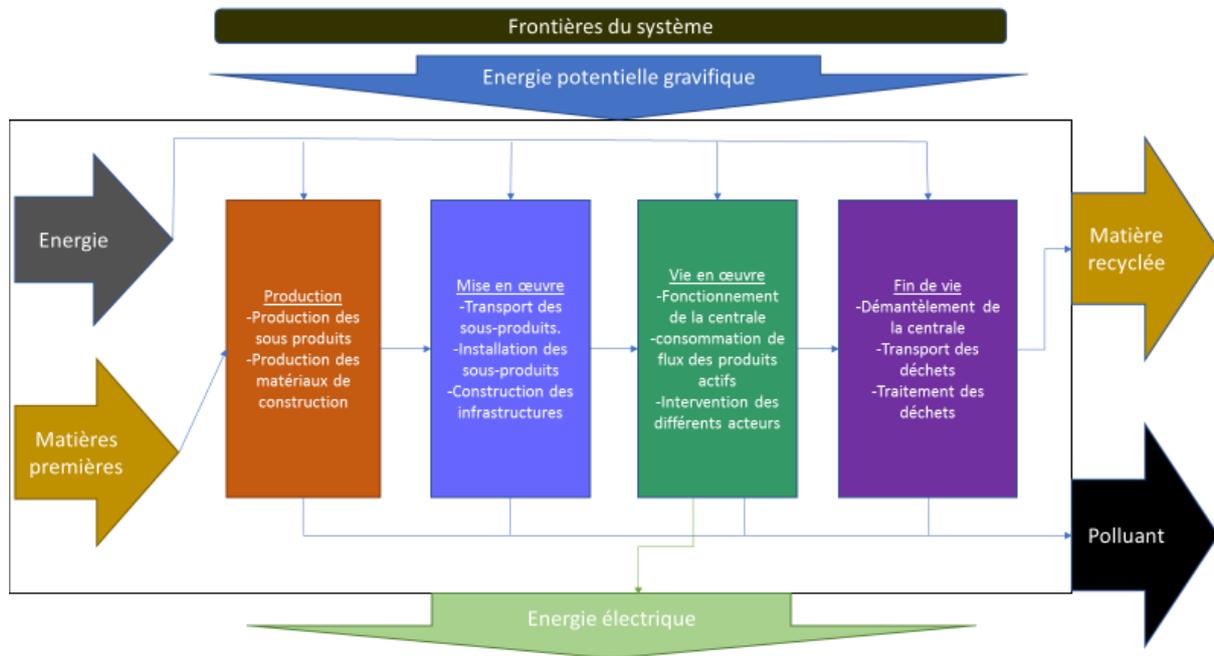


Figure 4 : Frontières du système

2.1.2.4.1. L'approvisionnement

Le cycle de vie commence par l'approvisionnement en matériaux et en énergie. Pour les matériaux et l'énergie, une délimitation géographique précise n'est pas définie. En effet, la provenance de chaque flux primaire n'est pas connue. Par exemple, lors de la visite de la société Spaans Babcock qui fournit la vis d'Archimède, la provenance du métal fut demandée mais aucune réponse ne fut apportée. La raison en est essentiellement économique. En effet, en fonction des fluctuations du marché du métal, les sites d'approvisionnement varient et ces données ne sont pas archivées de manière officielle au sein de la société. Toutefois, l'étude ici présente, se basant sur de nombreuses FDES et PEP, l'approvisionnement et le transport sont des données prises en compte et agrégées aux résultats. Les sous-systèmes évalués au moyen du programme open LCA prennent en compte cet approvisionnement.

2.1.2.4.2. Cycle de vie

L'encadré bleu représente le cycle de vie du système ainsi que celui de chaque sous-système. En fonction de l'unité fonctionnelle et de la durée de vie, le nombre de cycles de vie est adapté au cycle de vie de la centrale. L'approvisionnement intervient selon chaque sous-produit dans les différentes étapes du cycle de vie. Si un approvisionnement est nécessaire pour chaque étape du cycle de vie selon le sous-système, des extrants sont aussi engendrés par chaque étape. Certains de ces extrants sont considérés comme des déchets. La gestion de ces déchets est comprise dans cette analyse. Le fait que l'approvisionnement et la gestion des déchets interviennent dans les quatre étapes du cycle de vie est dû à la structure du système qui est constitué de sous-systèmes. Si on se met selon le point de vue du système entier, le traitement des déchets d'emballage intervient durant la mise en

œuvre de la centrale hydroélectrique et non à la fin du cycle de vie de la centrale. Le cycle de vie comprend donc quatre étapes : la production, la mise en œuvre, la vie en œuvre et la fin de vie.

- La production : cette étape du cycle de vie consiste en la production de chaque sous-système qui seront assemblés pour former le système global, la centrale hydroélectrique. Il s'agit de l'étape qui permet d'obtenir un produit fini à partir des matières premières à extraire. La phase de production s'arrête lorsque le produit fini passe les portes de l'usine de manufacture. S'ensuit alors l'étape de mise en œuvre.
- Mise en œuvre : lorsqu'un produit fini est affecté à une utilisation, il doit être mis en œuvre. Pour ce faire, il faut le déplacer vers son lieu d'utilisation et effectuer les travaux nécessaires pour l'installer et assurer son bon fonctionnement.
- Vie en œuvre : lorsque le produit est installé, celui-ci durant sa durée de vie assure sa fonction principale et sa ou ses fonctions secondaires. Durant cette étape, on étudie les principaux flux qui interviennent, si le produit est dans la catégorie des produits passifs, les principaux flux seront liés aux pièces d'usure et si le produit fait partie de la catégorie des produits actifs, il faudra ajouter aux flux liés aux pièces d'usure les flux d'énergie qui lui permettront de fonctionner. Lorsque le produit atteint sa fin de vie, il est nécessaire d'assurer une gestion de ce produit pour minimiser les impacts environnementaux de celui-ci.
- Fin de vie : la fin de vie consiste en l'étape de gestion des déchets engendrés par l'arrêt de l'utilisation d'un produit. Cette étape est assujettie aux différentes législations selon le lieu géographique de l'utilisation du produit.

La gestion des déchets se fait selon trois grands principes : le recyclage, la valorisation et enfin l'enfouissement en dernier recours. Une centrale hydroélectrique étant un système complexe, de nombreuses substances interviennent dans sa composition et donc, les procédés de traitement sont fort variés. Cependant, une hiérarchie de traitement existe entre les procédés. En premier lieu, l'ensemble des produits recyclables intègre une filière de recyclage. Lorsque les déchets ne sont pas recyclables mais valorisables, ils intègrent une filière de valorisation. Enfin, les déchets ni recyclables ni valorisables sont dirigés selon leur degré de dangerosité vers un centre d'enfouissement technique adapté.

2.1.2.4.3. Critères de coupure

La norme ISO 14 044, permet sous certaines conditions d'exclure certains flux des limites du système. Toutefois, chaque exclusion doit être argumentée et justifiée. Une exclusion peut se faire selon trois critères (afnor, 2006).

- ✓ La masse : un pourcentage de masse doit être défini selon lequel, les éléments dont la masse représente un pourcentage supérieur à celui défini sont inclus et les éléments dont la masse représente un pourcentage inférieur à celui défini sont exclus (ISO, 2009).
- ✓ L'énergie : un pourcentage d'intrants énergétiques doit être défini. Les éléments dont les intrants énergétiques sont supérieurs au pourcentage sont inclus et les éléments dont les intrants sont inférieurs au pourcentage sont exclus (ISO, 2009).

- ✓ La portée environnementale : une quantité de sous-produits ou processus élémentaires doit être définie selon leur pertinence environnementale. Les éléments dont la portée environnementale est supérieure à celle préalablement définie sont inclus et ceux dont la portée environnementale sont inférieurs sont exclus (ISO, 2009).

Dans le cadre de cette analyse, aucun critère de coupure ne sera utilisé. Toutefois, certains flux seront tout de même exclus du fait du manque de données d'inventaire pour un sous-produit ou processus élémentaire. Les flux exclus subiront toutefois une analyse de sensibilité afin de s'assurer que leur exclusion ne change pas de manière significative les résultats.

2.1.2.5. Affectation

Pour le système étudié, il n'y a pas lieu de définir des règles d'affectation. En effet, le système se basant sur un seul et unique produit, aucune règle d'affectation n'est nécessaire étant donné que tous les flux répertoriés sont affectés au seul et unique produit issu du système.

2.1.2.6. Méthodologie d'évaluation de l'impact du cycle de vie et les types d'impacts

Pour évaluer l'inventaire du cycle de vie, plusieurs méthodes furent utilisées. La raison de la diversification des méthodes tient en premier lieu d'une contrainte liée aux données d'inventaire et en deuxième lieu à la volonté du commanditaire de l'analyse du cycle de vie (MTBE s.a.)

Premièrement, la contrainte imposée par les FDES et PEP est due à l'agrégation des résultats présentés dans ces fiches. En effet, les détails de l'inventaire du cycle de vie n'étant pas communiqués au travers de ces fiches, il est nécessaire de respecter les différentes méthodes utilisées pour évaluer l'inventaire du cycle de vie. Les résultats de l'évaluation du cycle de vie ont donc été utilisés sans modification de la méthode d'évaluation du cycle de vie. Toutefois, un traitement des données issues des FDES et PEP fut tout de même réalisé lorsque ce fut nécessaire. Par exemple, les données de la phase de vie en œuvre furent adaptées en fonction du temps d'utilisation pour les produits dits actifs.

Deuxièmement, un des intérêts pour MTBE s.a. est de voir la production nette d'énergie par une centrale. De ce fait, la consommation d'énergie primaire devait apparaître comme catégorie d'impact. Il a donc fallu trouver une méthode qui évalue cette catégorie d'impact.

Pour obtenir des résultats cohérents, la sélection des catégories d'impact fut réalisée comme suit :

- ✓ dna l'impossibilité de modifier les catégories d'impact au sein des FDES et PEP, les catégories furent choisies sur base de ces fiches afin d'obtenir un maximum de résultats au sein des FDES et PEP. Il a donc fallu reprendre les catégories d'impacts apparaissant le plus souvent dans les fiches.
- ✓ Sur base de la sélection réalisée à partir des fiches, une première méthode fut sélectionnée afin d'obtenir des résultats pour les mêmes catégories d'impacts. Ensuite, deux autres méthodes furent utilisées pour compléter les résultats d'inventaire.
- ✓ Le fait d'uniformiser les catégories d'impact permet d'augmenter la complétude des résultats. De cette manière, chaque valeur d'impact au terme du travail sera de meilleure qualité. En effet, un résultat d'inventaire basé sur des données incomplète est difficilement utilisable.

Concrètement, sur base des FDES et PEP, les catégories d'impacts choisies sont :

- ✓ **Le potentiel de réchauffement climatique** : il s'agit de l'impact lié aux modifications de la composition de l'atmosphère qui engendre une augmentation globale de la température à la surface terrestre. Cet accroissement de la température est dû aux émissions de gaz à effets de

serre dont la concentration augmente dans l'atmosphère. L'unité utilisée pour exprimer les résultats obtenus pour cette catégorie est le Kg éq CO₂.

- ✓ **La diminution de la couche d'ozone** : il s'agit de la contribution du cycle de vie au phénomène de disparition de la couche de d'ozone stratosphérique protégeant la croute terrestre du rayonnement solaire. La disparition de cette couche est liée à la présence de gaz détruisant l'ozone tels que les CFC. L'unité de quantification de l'impact est le Kg éq CFC-11.
- ✓ **Eutrophisation** : phénomène lié à la présence d'éléments nutritifs tels que les matières organiques, les nitrates, etc. Le résultat est la modification de la composition des eaux par des mécanismes biologiques avec principalement, la diminution de la concentration en oxygène dissout qui bouleverse les équilibres biologiques au sein du milieu aquatique. Cet impact sur l'environnement est exprimé au moyen du Kg éq PO₄³⁻.
- ✓ **Création d'ozone photochimique** : catégorie d'impact exprimant la création d'ozone photochimique responsable du phénomène de smog. L'unité utilisée est le kg éq C₂H₄.
- ✓ **Consommation d'eau** : expression de la consommation d'eau durant tout le cycle de vie de chaque produit. Cette consommation est exprimée en m³ d'eau.
- ✓ **Consommation d'énergie primaire** : consommation de l'énergie primaire renouvelable et non renouvelable durant tout le cycle de vie pour chaque produit, sous-produit ou processus élémentaire. La consommation d'énergie primaire s'exprime en MJ.
- ✓ **Pollution de l'eau** : substances polluantes relâchées durant l'ensemble du cycle de vie dans les différents milieux aquatiques. Les quantités sont exprimées en fonction de leur toxicité en Kg éq 1,4 dichlorobenzène.

Les catégories d'impacts choisies sont issues des méthodes d'évaluation de type « baseline », il s'agit en fait des catégories d'impacts les plus utilisées dans les différentes analyses de cycle de vie. Le fait d'utiliser ces catégories communément employées est utile pour les futures comparaisons avec d'autres systèmes de production d'énergie.

Les méthodes utilisées pour évaluer les différents inventaires du cycle de vie des produits, sous-produits et processus élémentaires sont donc les méthodes CML baseline, Cumulative energy demand et ReCiPe 2008 midpoint.

CML baseline

La méthode d'évaluation CML fut mise au point au sein de l'université de Leiden en 2001 (Benini et al., 2014). Cette méthode englobe 1700 flows et peut être utilisée selon deux méthodes différentes. La méthode non-baseline qui fait intervenir une cinquantaine de catégories d'impacts. La méthode baseline évalue l'inventaire du cycle de vie selon les catégories d'impact les plus utilisées. On compte pour cette partie de méthode onze catégories d'impacts.

Method: CML (baseline)	
Impact category group	Name of the impact category in the method
Acidification	Acidification potential - average Europe
Climate change	Climate change - GWP100
Depletion of abiotic resources	Depletion of abiotic resources - elements, ultimate reserves
	Depletion of abiotic resources - fossil fuels
Ecotoxicity	Freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP inf
	Marine aquatic ecotoxicity - MAETP inf
	Terrestrial ecotoxicity - TETP inf
Eutrophication	Eutrophication - generic
Human toxicity	Human toxicity - HTP inf
Ozone layer depletion	Ozone layer depletion - ODP steady state
Photochemical oxidation	Photochemical oxidation - high Nox

Figure 5: Catégories d'impacts prise en compte par la méthode CML baseline. (Benini et al., 2014)

Les facteurs de caractérisation et de normalisation de cette méthode sont disponibles via un fichier Excel dans le lien suivant : <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>

Cumulative energy demand

Cette méthode d'évaluation du cycle de vie est uniquement basée sur les flux d'énergies primaires nécessaires au cycle de vie. Elle permet de connaître les différents types d'énergie et leur quantité respective pour le cycle de vie d'un produit ou service. La méthodologie se base sur une méthode publiée par Ecoinvent. Une extension de la méthode, et donc des facteurs de caractérisation, fut nécessaire pour inclure les flux apportés par les autres bases de données telles que ELCD (Benini et al., 2014). Les facteurs de caractérisation furent calculés sur base des valeurs calorifiques brutes des matériaux et des carburants (Benini et al., 2014).

Method: Cumulative Energy Demand (CED)		
Impact category group	Name of the impact category in the method	Reference unit
Non-renewable resources	Fossil	MJ
	Nuclear	MJ
	Primary forest	MJ
Renewable resources	Biomass	MJ
	Geothermal	MJ
	Solar	MJ
	Wind	MJ
	Water	MJ

Figure 6 Catégorie d'impact de la méthode "Cumulative energy demand". (Benini et al., 2014)

Cette méthode contient donc huit catégories d'impacts concernant l'énergie primaire. Pour l'utilisation des résultats obtenus via cette méthode, une agrégation fut effectuée afin de les présenter et d'avoir des résultats compatibles avec ceux obtenus dans les FDES et PEP. Les facteurs de normalisation et de pondération ne sont pas inclus dans la méthode.

ReCiPe

La méthode d'évaluation ReCiPe fut élaborée pour combiner deux autres méthodes à savoir la méthode Eco-indicator 99 et la méthode CML. La méthode se divise en deux selon le niveau de caractérisation. Premièrement, les indicateurs midpoint qui caractérisent jusqu'aux catégories d'impacts et deuxièmement, les indicateurs endpoint qui caractérisent jusqu'aux catégories de dommages (dommages sur la santé humaine, dommages sur la santé humaine et dommages sur la disponibilité des ressources) (Benini et al., 2014).

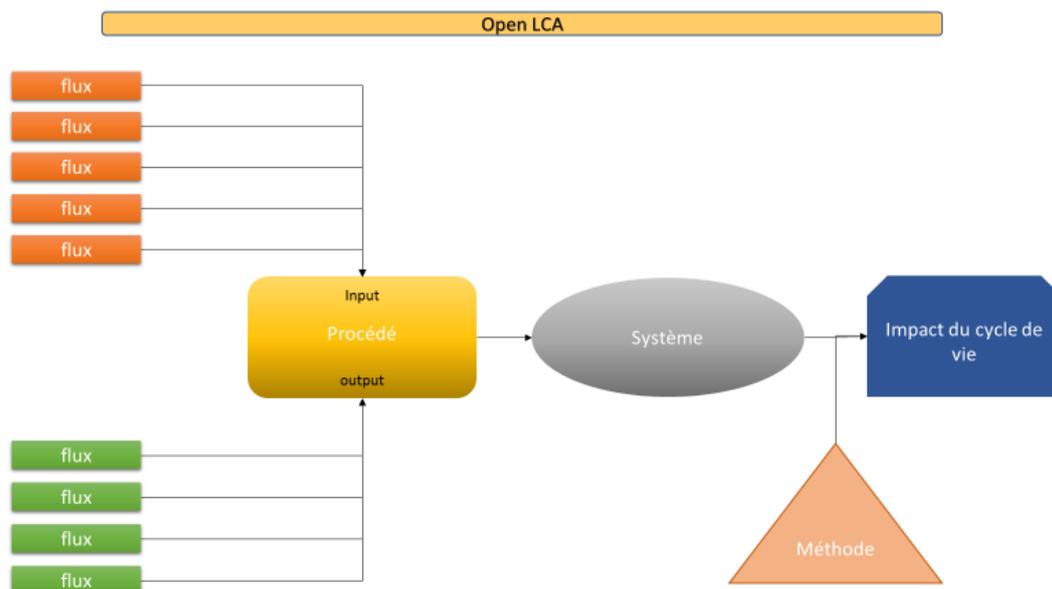
Method: ReCiPe midpoint (E, H & I)				
Impact category group	Name of the impact category in the method	E	H	I
Acidification	Terrestrial acidification	TAP500-E	TAP100-H	TAP20-I
Climate change	Climate Change	GWP500-E	GWP100-H	GWP20-I
Depletion of abiotic resources	Fossil depletion	FDPinf-E	FDP100-H	FDP20-I
	Metal depletion	MDPinf-E	MDP100-H	MDP20-I
	Water depletion	WDPinf-E	WDP100-H	WDP20-I
Ecotoxicity	Freshwater ecotoxicity	FETPinf-E	FETP100-H	FETP20-I
	Marine ecotoxicity	METPinf-E	METP100-H	METP20-I
	Terrestrial ecotoxicity	TETPinf-E	TETP100-H	TETP20-I
Eutrophication	Freshwater eutrophication	FEPinf-E	FEP100-H	FEP20-I
	Marine eutrophication	MEPinf-E	MEP100-H	MEP20-I
Human toxicity	Human toxicity	HTPinf-E	HTP100-H	HTP20-I
Ionising Radiation	Ionising radiation	IRPinf-E	IRP100-H	IRP20-I
	Agricultural land occupation	ALOPinf-E LOP-E	ALOP100-H LOP-H	ALOP20-I LOP-I
	Natural land transformation	LTPinf-E LTP-E	LTP100-H LTP-H	LTP20-I LTP-I
Land use	Urban land occupation	ULOPinf-E	ULOP100-H	ULOP20-I
	Ozone layer depletion	ODPinf-E M2E-E	ODP100-H M2E-H	ODP20-I M2E-I
Particulate matter	Particulate matter formation	PMFPinf-E	PMFP100-H	PMFP20-I
Photochemical oxidation	Photochemical oxidant formation	POFPinf-E	POFP100-H	POFP20-I

Figure 7 : Catégories d'impacts pour la méthode ReCiPe. (Benini et al., 2014)

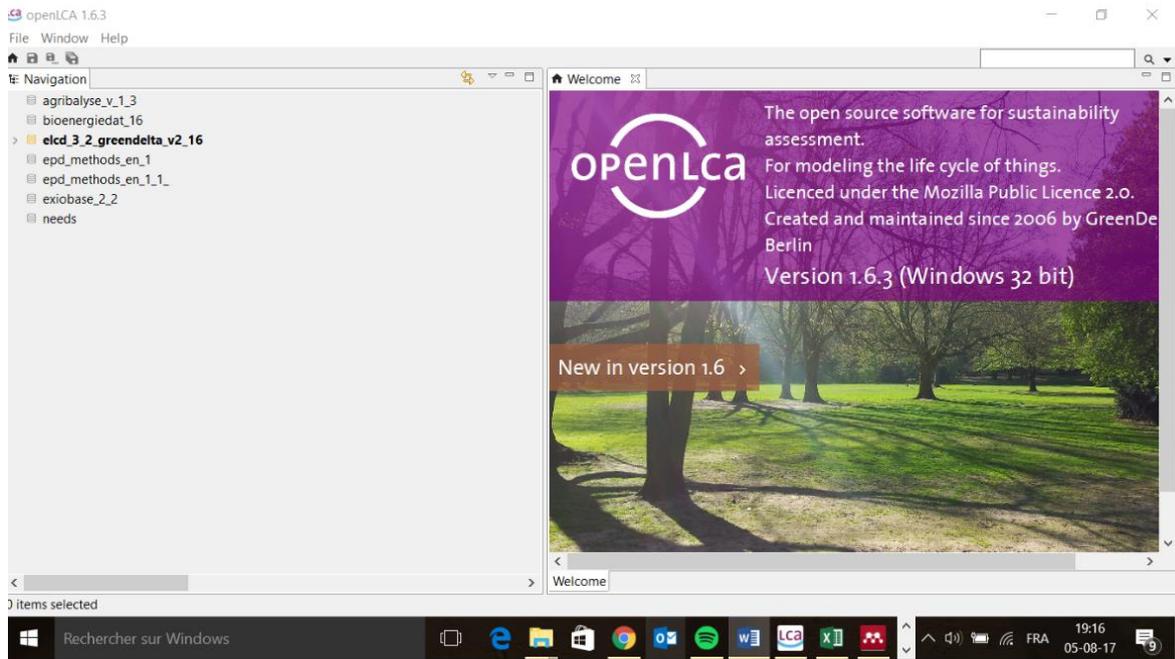
La méthode ReCiPe fut utilisée pour l'obtention du résultat sur la consommation d'eau. Toutefois, étant basée en partie sur la méthode CML, les résultats pour plusieurs catégories d'impacts sont identiques pour les deux méthodes.

2.1.2.6.1. Open LCA

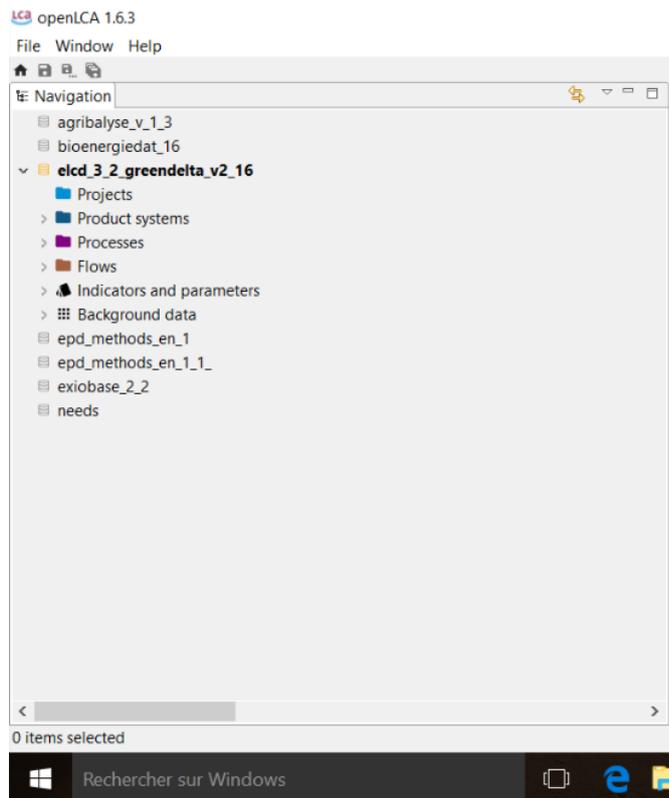
Le logiciel Open LCA traite de l'analyse du cycle de vie et fournit gratuitement un outil permettant de les réaliser. L'utilisation d'un logiciel informatique se révèle souvent indispensable tant les informations à traiter sont nombreuses (Jolliet et al., 2010). Le principe de fonctionnement du logiciel est basé sur des bases de données qui contiennent des flux qui sont inventoriés pour réaliser des procédés à partir desquels on peut créer des systèmes de produits. L'évaluation de l'inventaire du cycle de vie se fait lorsque les systèmes de produits sont construits en choisissant une méthode et en l'appliquant dans l'étape de calcul réalisée par le programme.



Le programme se présente comme suit.



La colonne de gauche présente les différentes bases de données qui ont été importées dans le programme.



Les flux présents dans les différentes méthodes peuvent être des flux élémentaires tels que l'émissions de CO₂ dans l'air, ou alors il peut s'agir de flux issus d'un processus comme l'énergie électrique produite par la technologie éolienne.

Chaque base de données contient six volets nécessaires à la création d'une analyse de l'inventaire d'un cycle de vie. L'utilisation des volets se fait de manière graduelle comme illustré dans le schéma ci-dessus. La première étape est de créer un flux de référence qui représente le produit étudié.

Ensuite, il faut créer un procédé et définir la référence quantitative qui est le flux de référence. Ce flux sera repris dans les outputs du procédé.

Le procédé se construit en ajoutant les différents flux répertoriés durant l'inventaire du cycle de vie. Lorsque tous les flux ont été intégrés au procédé (les inputs et les outputs) le système du produit peut être créé.

Enfin, l'analyse de l'inventaire du cycle de vie se calcule en définissant la méthode à adopter. Lorsque la méthode a été sélectionnée, le programme peut calculer l'impact du cycle de vie dans les différentes

catégories d'impacts. En regroupant plusieurs systèmes de produit, le programme permet également de monter un projet et d'obtenir un rapport automatique décrivant l'ensemble du projet.

L'utilisation de ce programme pour la réalisation de l'étude ici présente s'est limitée à l'analyse de l'inventaire du cycle de vie. La rédaction du rapport s'est faite indépendamment.

2.1.2.7. L'agrégation des résultats de l'évaluation de l'inventaire du cycle de vie des sous-produits et processus élémentaires

Chaque résultat est repris dans un fichier Excel. Le fichier Excel est organisé comme suit :

- ✓ Le fichier contient cinq pages : une page pour chaque étape du cycle de vie de la centrale hydroélectrique et une page qui résume l'impact environnemental en sommant les différents impacts calculés pour chaque étape du cycle de vie.

Production	Mise en œuvre	Vie en œuvre	Fin de vie	ACV
------------	---------------	--------------	------------	-----

- ✓ Les quatre feuilles concernant les étapes du cycle de vie sont organisées en tableaux. Chaque catégorie de sous-produits possède son propre tableau avec, en ordonnée les différents sous-produits et, en abscisse :
 - La quantité de chaque sous-produit qui sera utilisée,
 - L'unité, l'unité fonctionnelle,
 - Les catégories d'impacts pour une unité fonctionnelle,
 - La durée de vie,
 - Le nombre d'unités fonctionnelles nécessaires,
 - Le facteur de compatibilité,
 - Les catégories d'impacts globales du sous-produit pour toute la durée de vie.
- ✓ La cinquième page « ACV » s'organise selon trois tableaux :
 - Le premier reprend les caractéristiques principales de la centrale, à savoir : puissance nominale, production estimée sur la durée de vie, le nombre de vis, et la durée de vie.
 - Le second tableau reprend en abscisse les catégories d'impact et en ordonnée les catégories de sous-produits.
 - Le troisième tableau reprend en abscisse les catégories d'impacts et en ordonnée les quatre étapes du cycle de vie.

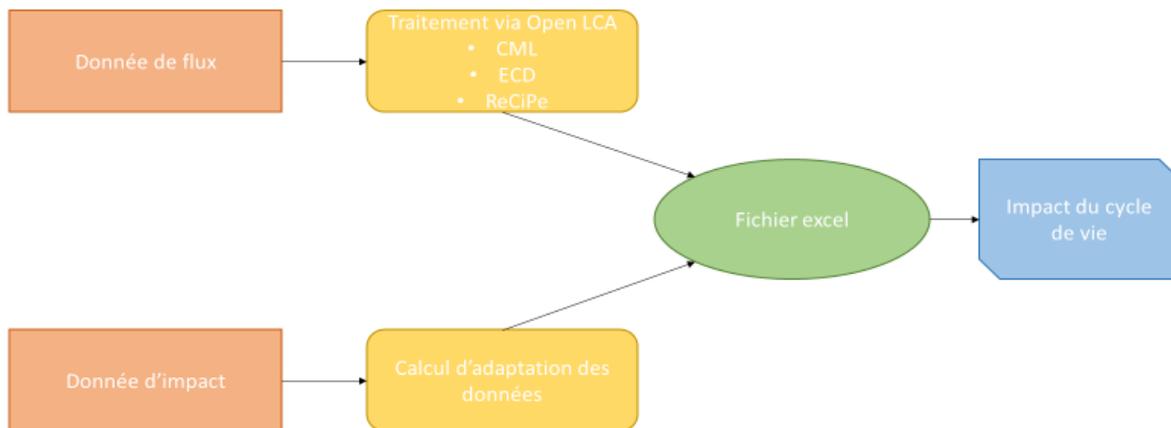


Figure 8: Schéma général de traitement des données.

2.1.2.8. La collecte des données

La collecte des données dans le cadre d'une analyse du cycle de vie d'un produit est une étape fastidieuse. En effet, chaque flux qui concerne le cycle de vie du produit en fonction des frontières du système doit être répertorié dans un inventaire que l'on nomme « inventaire du cycle de vie ». Cet inventaire se base donc sur la communication entre l'organisme fabriquant le produit étudié et l'organisme réalisant l'inventaire du cycle de vie. Si l'organisme fabriquant est commanditaire de l'étude, cette communication devrait se faire dans la transparence la plus totale. Ce fut le cas pour deux sociétés partenaires de MTBE s.a., à savoir Spaans Babcock le fabricant de la vis d'Archimède et E.M.S.D. le fournisseur pour la partie ferronnerie et électromécanique. Les informations sur les flux furent donc récoltées directement au sein de ces deux sociétés.

Toutefois, l'organisme réalisant l'inventaire du cycle de vie n'est pas toujours commandité par l'organisme fabriquant. Dans ce cas, la confidentialité d'entreprise vient se dresser comme un obstacle pour la réalisation de l'étude. De plus, la récolte des données nécessaires à l'établissement d'un inventaire pour un produit demande l'utilisation de ressources par l'organisme fabriquant (en temps et en main d'œuvre). Pour ces deux raisons, la plupart des industries sollicitées pour réaliser l'inventaire du cycle de vie ont décliné la demande d'information. Pour en donner une idée, voici un e-mail reçu par la société WEG qui est le fabricant du générateur de la centrale.

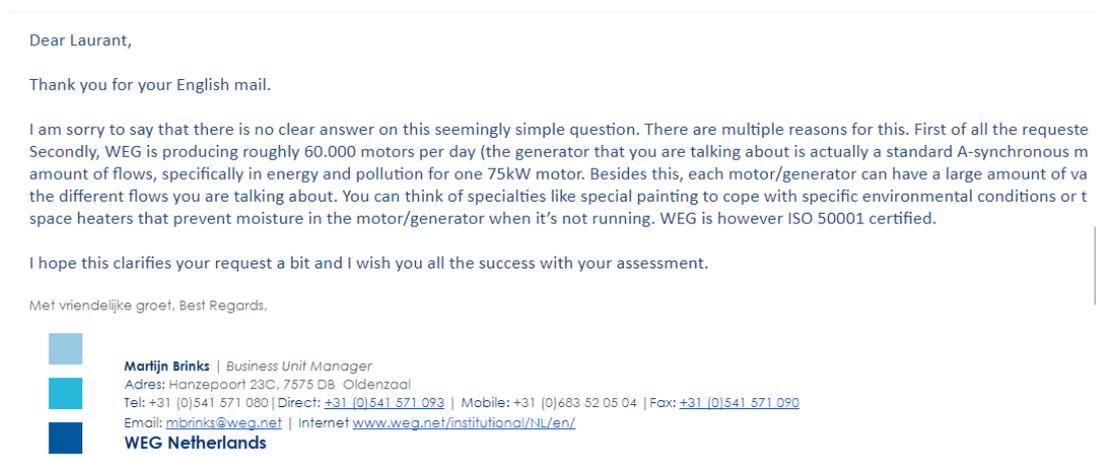


Figure 9 communication avec l'entreprise WEG

2.1.2.8.1. Données récoltées dans les fiches de déclarations environnementales et les profils environnementaux de produits

Après plusieurs réponses de ce type, une adaptation de la méthode a dû être réalisée. Il existe une base de donnée INIES qui regroupe un grand nombre de fiches traitant du cycle de vie, une sélection de produits utilisés pour la réalisation de la centrale hydroélectrique et de produit similaires à ceux utilisés fut réalisée. La base de données INIES n'est pas l'unique lieu de récolte d'informations. En effet, quelques sociétés telles que Schneider et ABB publient sur leur site internet des FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire) ou PEP (Profil Environnemental du Produit). Ces fiches décrivent l'impact environnemental de leur produit. L'élaboration de ces fiches s'est faite selon les normes ISO 14040 ou 14025. La norme ISO 14040 traite de l'analyse du cycle de vie et la norme ISO 14025 traite de la déclaration environnementale des produits (ISO, 2012). Le fait que ces fiches soient certifiées ISO confère de la crédibilité à leur utilisation et définit la méthode de travail selon laquelle elles ont été réalisées. La continuité entre les méthodes utilisées pour réaliser les fiches et ce travail permet également une adaptation de ces fiches au cas étudié ici. De plus, lorsque des PEP décrivent une gamme de produit, l'adaptation des impacts environnementaux selon un produit se fait par l'utilisation de règles d'extrapolation. Ces règles sont fournies dans les PEP. Cette méthode d'adaptation fut utilisée pour le convecteur de mise hors gel.

EXTRAPOLATION

Pour toutes les étapes, hors celle d'utilisation, le coefficient d'homothétie massique est calculé à partir d'une base 1 pour le produit de référence :
Base 1 = masse totale du produit de référence de la famille homogène, soit 1000W, emballage inclus

Le coefficient d'homothétie massique à utiliser pour toute autre puissance de la même famille homogène est le suivant :
Poids en kg / poids en kg du produit de référence
Le poids de l'appareil correspond à son poids global, exprimé en kilogramme (kg), tel que livré auprès du client, emballage inclus.

Aucune règle d'homothétie ne s'applique à l'étape d'utilisation : l'unité fonctionnelle définie du PSR, répond à un besoin, qui est indépendant de l'appareil.

REFERENCE	PUISSANCE (W)	POIDS EMBALLE (KG)	COEFFICIENT D'HOMOTHEIE MASSIQUE, CALCULE A PARTIR DU POIDS DU PRODUIT DE REFERENCE, SOIT 18,94 KG
RFLB060AM14	600	14,71	0,78
RFLB075AM14	750	16,64	0,88
RFLB100AM14	1000	18,94	1,00
RFLB125AM14	1250	24,34	1,29
RFLB150AM14	1500	26,60	1,40
RFLB200AM14	2000	32,95	1,74

Figure 10 : Règle d'extrapolation issues de la PEP du convecteur.

2.1.2.8.2. Difficultés liées à l'agrégation

Toutefois, l'agrégation des résultats pour la présentation des catégories d'impacts dans les fiches ne permet pas une adaptation totale des fiches au cas étudié dans ce travail. Par exemple, lorsqu'on considère le transport des produits dans une fiche, celui-ci, bien que décrit dans les notices d'explication des fiches, est agrégé aux autres impacts du produit. Ne possédant donc pas les résultats détaillés de l'ICV (inventaire du cycle de vie), il n'est pas possible d'isoler l'impact du transport pour l'adapter au cas pris en compte dans cette ACV.

2.1.2.8.3. Bases de données de flux

Pour les flux directement communiqués, un traitement de ceux-ci fut effectué. Une analyse du cycle de vie d'un produit se réalise à l'aide d'un programme informatique entièrement dédié à ce genre d'étude. Pour exemple, on peut citer le logiciel SimaPro, Gabi, CMLCA. Ces logiciels bien que très complets sont également très onéreux. Pour des raisons financières donc, un autre programme d'analyse du cycle de vie gratuit fut utilisé. Il s'agit du programme open LCA. Ce programme est distribué par la société Greendelta située à Berlin. Le logiciel open LCA est compatible avec un bon nombre de bases de données telles que les bases de données Ecoinvent. Toutefois, pour les raisons financières évoquées ci-dessus, les bases de données utilisées furent celles distribuées gratuitement.

Les bases de données utilisées sont :

- ✓ Agribalyse 1.3 : la base de données Agribalyse fut mise au point par l'ADEME pour fournir gratuitement des données nécessaires à la réflexion sur l'écoconception des procédés agricoles (ADEME, 2016). Elle contient des flux et des procédés qui interviennent également dans la centrale hydroélectrique qui est étudiée ici tel que l'acier galvanisé ;
- ✓ ELCD (European Life cycle database) 3.2 greendelta v2.16 : est une base de données, fournie par la commission européenne, orientée vers les matériaux, les fournisseurs d'énergies, le transport et le traitement des déchets (European Commission, 2013) ;
- ✓ NEEDS (New energy externalities development for sustainability) élaborée par la communauté européenne pour l'évaluation des politiques énergétiques et des futurs systèmes énergétiques. Elle permet de comparer différents systèmes énergétiques selon les moyens de production. En effet, cette base de données contient les systèmes de production tels que l'éolien, le photovoltaïque, le solaire thermique, le nucléaire, la biomasse etc. De plus, cette base de données contient des processus qui interviennent aussi dans le cycle de vie de la centrale hydroélectrique étudiée ici.

Le détail des données recueillies pour chaque sous-système est repris à l'annexe 1.

2.1.2.9. Exigences portant sur les données

Les données recueillies durant l'inventaire du cycle de vie furent évaluées selon certaines caractéristiques. Les critères d'évaluation sont définis par l'ISO 14044 mais les critères d'admission sont définis par le réalisateur de l'étude.

Les critères d'admissions sont donc :

- ✓ La portée temporelle : les données recueillies doivent être représentatives du XXI^{ème} siècle. Le critère de la durée de validité par rapport à la durée de vie du système n'est pas retenu. En effet, le système possédant une durée de vie relativement longue, la plupart des données disponibles ne sont pas valables pour une durée équivalente à celle du cycle de vie ;
- ✓ La portée géographique : la zone géographique concernée par les données doit être équivalente au continent européen. La plupart des données disponibles sont représentatives du continent européen et la plupart des sous-produits proviennent du continent européen ;
- ✓ La portée technologique : l'ensemble des données recueillies doivent concerner la technologie utilisée pour la centrale hydroélectrique ou des technologies équivalentes ;
- ✓ La fidélité : la variabilité des données ne doit pas changer de manière significative les résultats de l'analyse du cycle de vie ;
- ✓ La complétude : les flux récoltés pour chaque sous-produit ou processus élémentaire doivent couvrir une part suffisante des flux réels que pour être représentative de l'impact environnemental du sous-produit ou processus élémentaire ;
- ✓ La cohérence : chaque donnée récoltée doit permettre d'appliquer la méthodologie d'évaluation décrite dans ce travail ;
- ✓ La reproductibilité : aucun critère de reproductibilité ne sera appliqué pour la sélection des données. En effet, certaines données essentielles à l'établissement de cette ACV n'étant pas disponibles pour le public et la communication de ces données d'inventaire étant liée à l'étroit partenariat des sociétés avec MTBE s.a., elles ne seront pas disponibles pour un acteur tiers voulant reproduire l'étude ;
- ✓ Les sources de données : les données doivent provenir d'une source jugée pertinente par le réalisateur de l'étude. Les critères de pertinence retenus par le réalisateur sont :

- les données proviennent d'un organisme concerné par le sous-produit ou processus élémentaire ;
 - les données proviennent d'un organisme spécialisé dans l'analyse du cycle de vie ;
 - les données sont reconnues par la communauté scientifique internationale ;
- ✓ L'incertitude liée aux informations : Une incertitude limitée est requise pour la sélection des données. En effet, le critère d'exclusion de données du système considéré est l'expertise d'au moins un référent fournissant la donnée. C'est-à-dire que toute donnée estimée uniquement par le réalisateur de cette étude n'est pas retenue. Ce mécanisme d'exclusion est lié au statut du réalisateur de cette analyse du cycle de vie. L'expérience de l'étudiant réalisant sa première analyse du cycle de vie et n'étant pas un expert dans chaque domaine d'où proviennent les sous-produit et processus élémentaire est jugée comme non suffisante.

2.1.2.10. Traitement des données manquantes

Les données manquantes doivent tout de même être traitées. Trois mécanismes de traitement sont prévus dans la norme ISO 14044.

1. Estimation d'une valeur non nulle avec la justification de la valeur estimée ;
2. Considération d'une valeur nulle avec justification du choix ;
3. Calcul de la valeur sur base de processus élémentaires utilisant des technologies similaires.

Le tableau suivant reprend le traitement des données manquantes.

Référence	Sous-produit	Etape du cycle de vie	Type de traitement de la donnée	Justification
GC 1	Composition du Béton	Production	Valeur non nulle	Donnée reprise sur guidebeton.com pour le béton armé. Composition homogène du béton pour l'ensemble des ouvrages de génie civil. (Bernard, n.d.)
EM 16	Alternateur	Production	Calcul	Calculs basés sur un alternateur provenant de chez ABB. Utilisation de l'unité fonctionnelle pour l'adaptation des données. (Laatu, 2002)
EM 17	Alternateur	Production	Calcul	Calculs basés sur un alternateur provenant de chez ABB. Utilisation de l'unité fonctionnelle pour l'adaptation des données. (Laatu, 2002)
EM 18	Alternateur	Production	Calcul	Calculs basés sur un alternateur provenant de chez ABB. Utilisation de l'unité fonctionnelle pour l'adaptation des données. (Laatu, 2002)
Tu 2	Boite de vitesse	Production	Valeur nulle	Aucune donnée disponible remplissant les critères d'exigences.
Tu 3	Alternateur	Production	Calcul	Calculs basés sur un alternateur provenant de chez ABB. Utilisation de l'unité fonctionnelle pour l'adaptation des données. (Laatu, 2002)
DI 1	Bouche de ventilation	Production	Valeur non nulle	Prise en compte d'un sous-produit similaire. (Ecocem, 2014)
DI 3	Convecteur	Production	Valeur non nulle	Prise en compte d'un sous-produit similaire. (Néomitis, 2015)
DI 4	Kit de vidéo surveillance	Production	Valeur non nulle	Prise en compte d'un sous-produit similaire. (Schneider Electric, 2012)
GC	Installation du chantier	Mise en œuvre	Valeur non nulle	Estimation basée sur l'expertise du gestionnaire de projet. (Burton, 2017)
Hy 1	Groupe oléo-hydraulique	Production et fin de vie	Valeur nulle	Aucune donnée disponible remplissant les critères d'exigences.

2.1.2.11. Hypothèses

Une analyse du cycle de vie est dans la plupart des cas fondée sur au moins une hypothèse. Cette ou ces hypothèses sont nécessaires afin de pouvoir quantifier un aspect que l'on ne peut directement mesurer. Cette analyse se base également sur plusieurs hypothèses de flux et de données.

2.1.2.11.1. Hypothèse de production électrique sur le cycle de vie.

L'analyse du cycle de vie ici présente se base sur une hypothèse comme donnée principale. En effet, la production annuelle de la centrale fut estimée à 330 MWh. Ce résultat se base sur l'hypothèse de la pluviométrie moyenne du bassin versant de la Sambre. Etant donné que l'unité fonctionnelle fait référence à un kWh d'électricité produit, il a fallu estimer la production d'électricité sur trente ans (qui est la durée de vie de la centrale) pour obtenir le facteur de rattachement à l'unité fonctionnelle. Cette hypothèse mène à un résultat de 16 500 000 kWh produit sur l'ensemble du cycle de vie (Cozannet, 2016a). Bien qu'étant le fruit d'une estimation, cette donnée est le fruit du travail du groupe d'experts responsable des études préalables à la gestion du projet, elle possède donc une pertinence jugée suffisante.

2.1.2.11.2. Hypothèse de durée du cycle de vie

Le cycle de vie de la centrale hydroélectrique est basé sur une durée de trente ans. Cette durée du cycle de vie se base sur la durée de vie de certains éléments principaux de la centrale. Une durée de vie de trente ans a été estimée pour :

- ✓ La vis d'Archimède
- ✓ L'alternateur
- ✓ La boîte de vitesse

Ces éléments sont centraux pour la centrale, la durée de vie est donc calculée sur base de ces trois éléments. Toutefois, ils ne représentent pas les éléments les plus importants que ce soit en termes de coût, de masse et d'énergie. Les éléments les plus importants en ces termes sont les éléments de génie civil. En effet, pour se donner une idée, le génie civil représente environ la moitié du coût d'investissement de la centrale (Zoungrana, 2015). La durée de vie du béton, principale matière du génie civil, est estimée à cent ans. On pourrait donc se baser sur cette durée de vie pour l'analyse du cycle de vie de la centrale. Cependant, se baser sur une durée de vie trop longue n'est pas pertinent pour plusieurs raisons :

- ✓ Les éléments à remplacer sur cette durée seraient trop variables de générations en générations. En effet, l'évolution de la société telle que, l'avancée des technologies, les besoins d'innovations, l'épuisement des ressources, etc, ferait que les sous-produits fabriqués aujourd'hui seraient trop différents des sous-produits de la centrale fabriquée dans cent ans. Cette différenciation entre les générations des sous-produits rend donc un calcul sur une durée de vie trop longue impertinent et augmente les incertitudes de manière significative.
- ✓ Les conditions climatiques qui représentent pour l'avenir une inconnue des plus incertaines avec les variations actuelles sont également un argument pour opter pour une durée du cycle de vie de trente ans. En effet, comme expliqué ci-dessus, un des piliers fondateurs de cette analyse est la continuité des caractéristiques pluviométriques entre la période de mesure des débits de la Vesdre (calcul basé sur les débits moyens des trente années précédentes) et la durée du cycle de vie de la centrale. Allonger la durée du cycle de vie ne ferait qu'affaiblir l'analyse en prenant le pari risqué de la stabilité des conditions météorologiques du bassin versant de la Vesdre.
- ✓ Le calcul financier de la centrale intègre deux éléments principaux, la vente des certificats verts octroyés par la région Wallonne en fonction de la production d'électricité et la vente de l'électricité produite. Le système de promotion des énergies renouvelables par l'octroi de certificats est depuis leur création un paramètre financier variable. Le prix de vente de l'électricité est également un paramètre variable au cours du temps. L'évolution des conditions financières du projet représente donc un potentiel de changement pour la centrale sur une longue durée. Des conditions financières plus favorables pourraient faire augmenter la capacité de production de la centrale et

à contrario, des conditions moins favorables pourraient dans des cas extrêmes engendrer l'abandon du site.

- ✓ Le permis d'exploitation délivré par la région Wallonne pour la centrale a une période de validité de trente ans. Il n'est donc pas sûr que, passé ce délai, un nouveau permis d'exploitation sera délivré pour continuer l'exploitation du site.
- ✓ La centrale hydroélectrique est pour certains riverains une source de nuisance. Pour cette raison, l'exploitation de la centrale est sous la menace d'une décision judiciaire suite à un recours au conseil d'état.

2.1.2.11.3. Hypothèses d'adaptation des unités.

L'utilisation des deux différentes sources de données à savoir d'une part les FDES et PEP et d'autre part les bases de données, pose un problème de continuité pour certain facteur d'indicateur d'impact. En effet, les catégories d'impacts de la pollution de l'eau et l'utilisation des ressources abiotiques ne sont pas exprimées dans la même unité d'indicateur.

Pollution de l'eau

La pollution de l'eau est exprimée comme suit selon la provenance des données.

Données	Unité	Définition
FDES et PEP	m ³	« <i>This indicator represents the water toxicity. It takes into account the usually accepted concentrations for several substances in water and the quantity of substances released over the life cycle. The indication given corresponds to the water volume needed to dilute these substances down to acceptable concentrations.</i> »(Schneider Electric, 2010e)
Base de données	Kg éq 1-4 dichlorobenzène	Cette catégorie d'impact prend en compte l'émission de substances toxique pour les milieux aquatiques.(Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppés, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, 2001a)

La décision prise pour adapter les unités est de transformer les m³ en kg éq 1-4 dichlorobenzène. Cette transformation s'est faite grâce à la donnée de la concentration critique du 1-4 dichlorobenzène issue de (Gillet, 2006). En effet, ce document nous renseigne une PNEC pour l'eau de 2*10⁻⁵ kg/m³ de 1-4 dichlorobenzène. La PNEC (Predicted No Effect Concentration) est la valeur seuil de concentration pour laquelle on n'observe pas d'effet toxicologique (Gillet, 2006). Donc chaque m³ relaté dans les FDES et PEP correspond à une masse de 2*10⁻⁵ kg éq 1-4 dichlorobenzène.

Epuisement des ressources naturelles

Données	Unité	Définition
FDES et PEP	Y ⁻¹	« <i>This indicator quantifies the consumption of raw materials during the life cycle of the product. It is expressed as the fraction of natural resources that disappear each year, with respect to all the annual reserves of the material.</i> »(Schneider Electric, 2010e)
Base de données	Kg éq Sb	L'indicateur fait correspondre la consommation de chaque matière première par rapport aux réserves ultimes estimées respectivement. Le rapport calculé entre consommation et réserve est reporté à la réserve d'antimoine pour obtenir la quantité d'équivalent antimoine. (Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppés, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, 2001a)

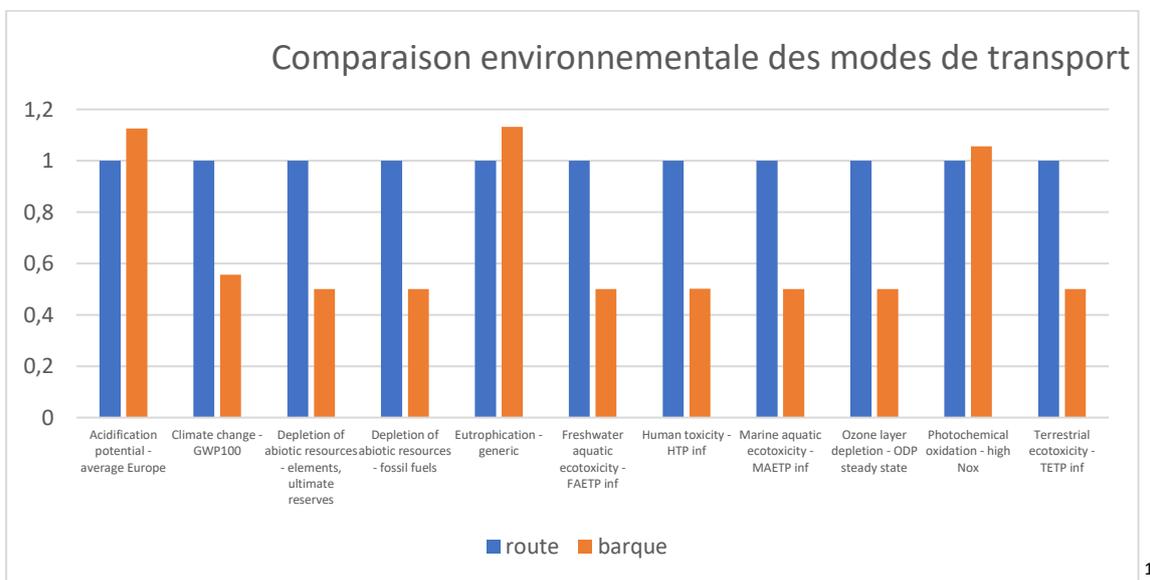
Le traitement des données pour obtenir des facteurs de caractérisation identiques se fera comme suit.

La réserve annuelle d'antimoine est estimée à 6.06*10⁷ kg (Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppés, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.;

Bruijn, H. de; Duin, 2001b). Pour exprimer la part de consommation sur les réserves annuelles en kg éq Sb des matières premières, il faut donc multiplier la valeur exprimée en Y^{-1} par la réserve annuelle d'antimoine à savoir $6.06 \cdot 10^7$ kg.

2.1.2.11.4. Hypothèse de la distance de transport des matières premières lorsque les données sont manquantes.

Lors de l'inventaire du cycle de vie, les distances d'approvisionnement pour les matières premières n'ont pas toujours pu être déterminées. En cause, les règles qui régissent le marché de ces matières premières et qui influencent les choix de fournisseurs et donc les distances de transport des matières premières. Pour fixer cette variable, une distance de 1000 km a été choisie. Le mode de transport sélectionné est le transport par camion semi-remorque de trente tonnes. Le transport par camion ayant un impact plus important que le transport par bateau (pour huit catégories d'impacts de la méthode CML baseline sur onze) on couvre de cette manière l'impact des distances plus longues de transport par bateau.



Graphique 1 : comparaison des modes de transport (Greendelta, n.d.)

Le choix de la distance des 1000 km comme standard est issu de la consultation des nombreuses FDES et PEP dans lesquelles les distances standards de transport sont également de 1000 km.

¹ Pour des raisons de clarté de présentation, l'ensemble des catégories d'impacts du transport par route a été ramenée à un et les catégories d'impacts du transport par bateau ont été traitées par la même règle de trois.

3. Résultats

3.1. Inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie s'est donc fait sur base de la méthodologie décrite dans la section « La collecte des données » dans la définition du champ.

Les résultats d'inventaire sont répertoriés dans cette section.

3.1.1. Résultats d'inventaire

3.1.1.1. Génie Civil

L'inventaire du génie civil fut réalisé sur base du métré réalisé par le bureau d'étude MTBE s.a. Sur base de ce document, les données de flux furent extraites.

Tableau 1 : données de flux de matériaux et produits pour le génie civil.

Génie Civil			
Matériel	Quantité	Distance de transport	Procédé de mise en place
Béton	317 m ³	15 km	Pompage par camion pompe
Acier d'armature	31700 kg	3,6 km	Manutention par grue
Bloc de construction en béton	29 m ²	Idem FDES	Pose à la main
Double porte métallique	1	Idem PEP	Pose à la main
Fenêtre fixe et châssis en PVC	2	Idem PEP	Pose à la main
Crépis	29 m ²	Idem FDES	Pompe de projection
Panneaux de toiture	16 m ²	Idem PEP	Pose à la main
Barrière de limitation du site	55 m	Idem PEP	Pose à la main
Déchets inertes à évacuer	1352 m ³	12,7 km	Excavation

Ce tableau ne reprend donc pas des flux élémentaires mais des flux de matières et produits. Les flux élémentaires associés aux éléments repris dans ce tableau sont compris dans les données d'impact fournies par les FDES, PEP ou bases de données utilisées.

Béton

Selon les recherches bibliographiques, la composition du béton suivante a été retenue.

Tableau 2 : composition d'un mètre cube de béton prise en compte.

Ciment	400	Kg
Gravier	980	Kg
Sable	720	Kg
Eau	195	l

Suite à ce tableau, on peut calculer la densité du béton à 2295 kg/m³. La quantité de transport est donc de $15 * 2.295 * 317 = 10912.725 \text{ t*km}$.

Le sous-traitant pour la mise en place du béton (le pompage) communique une consommation de 20l/h de sa pompe et les étapes de pompage sur trois jours différents. La durée de totale de pompage a été estimée à 5,5 heures. Le déplacement de la pompe de trois fois 7.2 km pour rentrer au siège de l'entreprise CHENE est donc pris en compte pour une masse du camion pompe de 24 000 kg.

La mise en œuvre du béton se résume donc par

Transport	11431	T*km
Pompage	110	L de diesel

Acier d'armature

L'acier d'armature a été utilisé pour une masse de 31700kg (100kg/m³). Le placement de cette armature se faisant essentiellement à la main, la mise en œuvre ne comprend que son transport

3.1.1.2. Electromécanique

L'inventaire de flux pour la partie électromécanique s'est fait à partir d'une fiche élaborée au sein de MTBE s.a. La fiche comprend l'ensemble des éléments ou sous-produits utilisés pour la centrale hydroélectrique. Cette fiche est disponible en annexe 3.

Suite à cet inventaire et selon les critères nécessaires à la prise en compte de données définies dans le champ, les flux de sous-produits pris en compte sont les suivants.

Tableau 3 : inventaire de sous-produits utilisés pour la centrale.

Référence	Sous-produit	Utilisation directe des données de la PEP ou FDES	Données nécessaires à la modification
EM 1	Automate M340	Oui	/
EM 2	Interface machine 7,5"	Non	Durée de fonctionnement : Une heure par mois. Donnée fournie par Denis Rutten
Electricité TGBT			
EM 3	Armoire électrique	Oui	/
EM 4	Cable d'alimentation/injection compteur	Oui	/
EM 5	Cable de raccordement de la génératrice au TGBT	Oui	/
EM 6	Cable de mise à la terre	Oui	/
EM 7	Relais de découplage	Oui	/
EM 8	Variateur de fréquence	Oui	/
Electricité tertiaire			
EM 10	Neon	Non	Durée de fonctionnement : Une demi-heure par mois. Donnée fournie par Denis Rutten
EM 11	Interrupteur	Oui	/
EM 12	Prise monophasée	Oui	/
EM 13	Prise triphasée	Oui	/
EM 14	Spot extérieur	Non	Durée de fonctionnement
Dégrilleur			
EM 15	Variateur de fréquence Altivar 312	Non	Durée de fonctionnement : 30 minutes par jour. Donnée fournie par Denis Rutten
EM 16	Automate	Non	Durée de fonctionnement : 30 minutes par jour. Donnée fournie par Denis Rutten
EM 17	Moteur 1,5 kW	Non	Durée de fonctionnement : 10 minutes par jour. Donnée fournie par Denis Rutten
EM 18	Moteur 200 W	Non	Durée de fonctionnement : 50 minutes par jour. Donnée fournie par Denis Rutten
EM 19	Moteur 0,75 W	Non	Durée de fonctionnement : 1 minutes par jour. Donnée fournie par Denis Rutten

Ce tableau montre donc que l'ensemble des données utilisées pour analyser l'impact du cycle de vie de la partie électromécanique de la centrale sont issues de FDES ou PEP dont les données peuvent être utilisées directement ou non. Toutefois, l'adaptation des données issues de ces fiches n'est pas totale. Cette constatation est liée à l'agrégation des résultats de l'analyse du cycle de vie dans les fiches qui représente un obstacle qui n'a pas su être surmonté.

3.1.1.3. Ferronnerie

Les données d'inventaire de flux pour la ferronnerie sont également issues de l'annexe 3. En considérant les critères nécessaires à la prise en compte des données dans le système, l'inventaire de sous-produits réalisé pour la partie ferronnerie est le suivant.

Référence	Sous-produits	Quantité (kg)	Energie de d'assemblage (kWh)
Fe 1	Support de sonde	874	5
Fe 2	Grille 120 mm entre ferre	1163	15
Fe 3	Prégrille	528	10
Fe 4	Portique dégrilleur	1514	10
Fe 5	Caillebotis	836	25
Fe 6	Garde-corps	417	25
Fe 7	Passerelle amont	391	25
Fe 8	Vanne de garde	1802	30
Fe 9	Dégrilleur automatique	1581	40

Ces données sont fournies par le fournisseur, à savoir E.M.S.D. Les données de production du matériau sont issues de la base de données Agribalyse qui contient un processus élémentaire de production d'acier galvanisé.

Les données pour la mise en place de ces éléments sont issues d'internet (google maps) pour les distances de transport et de E.M.S.D. pour les flux énergétiques nécessaires à la mise en œuvre.

3.1.1.4. Turbinage

Les flux obtenus pour la section turbinage proviennent principalement du fournisseur pour cette partie, à savoir Spaans Babcock. Les données communiquées par le fournisseur sont reprises à l'annexe 4.

De ces données, sont repris les différents flux utilisés pour la production de la vis d'Archimède et de l'auge.

Tableau 4 : inventaire des données issues de la société Spaans Babcock

Intrants	Quantité	Unité
Energie électrique	3805	kWh
Métal	11500	Kg
Peinture	210	l
Oxygène	1500	l
Argon	2000	l
Acétylène	1500	l
Métal à recycler	575	kg
Transport recyclage	20*0,575 = 11,5	t*km

Les volumes de gaz repris dans cet inventaire sont considérés en CNTP (Keuning, 2017).

3.1.1.5. Divers

Selon l'annexe 3, les produits repris dans l'inventaire de sous-produits utilisés pour la centrale sont les suivants :

Référence	Sous-produit	Utilisation directe des	Données nécessaires à la modification
-----------	--------------	-------------------------	---------------------------------------

		données des FDES ou PEP	
DI 1	Bouche d'extraction	Non	Données climatiques de Uccle (energiepluslesite), propriétés thermiques des différents matériaux
DI 2	Thermostat	Oui	
DI 3	Convecteur 2000 W	Non	Données climatiques de Uccle et propriétés thermiques des matériaux
DI 4	Kit de vidéo surveillance	Oui	

3.1.2. Validation des données

La validation s'est faite selon les critères d'exigences sur la qualité des données. En effet, à part une exception, chaque donnée respecte les exigences éditées dans la section « Exigences portées sur les données ». Le seul flux qui ne respecte pas un seul critère d'exigence portant sur les données à savoir la portée géographique est le kilogramme d'acier galvanisé. Le flux concerne l'Amérique du nord. Il a tout de même été utilisé dans l'inventaire du cycle de vie pour plusieurs raisons :

- ✓ Il s'agit de la seule donnée concernant la production d'un kilogramme d'acier galvanisé qui ait été trouvé dans les bases de données disponibles et qui permette d'analyser l'inventaire selon les catégories d'impact sélectionnées. Une autre source traitant l'impact environnemental du cycle de vie de l'acier galvanisé a été trouvé dans la bibliographie (Woolley, 2008), toutefois les catégories d'impacts utilisées dans ce document n'étaient pas suffisamment représentatives de l'échantillon de catégories sélectionné dans ce document. Sur les huit catégories d'impact, seule quatre étaient représentées dans ce document. De plus, étant donné que l'acier galvanisé représente une section entière de la centrale hydroélectrique, il n'était pas possible de considérer une valeur nulle pour ce flux.
- ✓ L'Amérique du nord représente une société occidentale à l'instar de l'Europe. Si des disparités doivent être présentes entre les deux procédés de fabrication selon les continents celles-ci ne doivent pas être significatives par rapport à l'impact environnemental. On peut toutefois considérer que l'impact en Amérique du nord doit être supérieur si on se réfère à l'impact du mode de vie des citoyens respectifs sur les deux continents.

La validation des données a donc été qualitative. La norme ISO propose de réaliser une validation quantitative se basant sur les bilans de masse ou d'énergie. La validation selon les bilans de masse et d'énergie sera réalisée durant la phase d'analyse de l'impact environnemental.

3.1.3. Rattachement des données au processus élémentaire et à l'unité fonctionnelle

Chaque donnée a été rattachée au processus élémentaire de la centrale hydroélectrique qui la concerne. A partir des données brutes récoltées, un facteur de compatibilité avec le processus élémentaire a été calculé. Ce facteur reprend le rapport de durée de vie et le nombre de sous-produits ou processus élémentaires nécessaires. Par exemple, pour la surveillance de la centrale, quatre caméras sont nécessaires. La durée de vie des caméras est de dix ans. Pour ramener les données au processus élémentaire de surveillance de la centrale pendant 30 ans, le facteur de compatibilité a été calculé comme équivalent à douze.

$$1 \text{ caméra (surveillance d'un quart de la centrale pendant 10 ans)} * 4 \text{ (surveillance de la centrale complète)} * 3 \text{ (durée de surveillance de 30 ans)} = 12$$

Il faut donc multiplier l'impact d'une caméra par douze pour obtenir l'impact du processus élémentaire de surveillance de la centrale.

Le rattachement à l'unité fonctionnelle a été réalisé lorsque tous les résultats d'analyse de l'inventaire ont été réalisés.

3.1.4. Affinage de la frontière du système

L'analyse du cycle de vie est un processus itératif. Il convient donc de réaliser des ajustements dans les sections qui servent d'encadrement à l'analyse. La définition des objectifs et du champ doit donc être adaptée en fonction des résultats obtenus tout au long obtenu durant la réalisation de l'analyse. En tant que section ayant une importance capitale, la définition des frontières du système a le plus souvent besoin d'être ajustée en fonction des résultats de l'inventaire du cycle de vie et des exigences portant sur les données.

Dans le cadre de ce travail, le réajustement des frontières du système a conduit à l'exclusion de :

- ✓ La production et la vie en œuvre de la boîte de vitesse raccordant la vis hydrodynamique au générateur a été exclue des frontières du système. Cette exclusion est due aux exigences portant sur les données. En effet, aucune donnée jugée suffisante n'a été inventoriée durant l'inventaire du cycle de vie.
- ✓ Le processus élémentaire de régulation au moyen d'outils oléo-hydrauliques a été exclu des frontières du système. Ce processus comprend le groupe oléo-hydraulique, l'actuateur de vanne, le frein de la vis et les capteurs de fin de courses. Ce processus a été exclu en raison du manque de données recueillies durant l'inventaire du cycle de vie.
- ✓ Les sondes de niveau hydrostatique et à ultrasons en raison du manque de données jugées suffisantes résultant de l'inventaire du cycle de vie.

3.2. Evaluation de l'impact du cycle de vie

La phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie permet de quantifier l'impact de chaque flux pris en considération dans le cycle de vie. La quantification se base sur les propriétés de chaque flux et le rôle de ceux-ci dans les différents processus environnementaux concernés par les catégories d'impacts sélectionnées dans le cadre de cette analyse. Chaque flux doit donc être attribué à la ou les catégories d'impacts sur la ou lesquelles il a une influence. Lorsque les flux sont attribués, il faut quantifier son influence sur la problématique environnementale qui est représentée par la catégorie d'impacts. La quantification se fait par l'application du facteur de catégorisation à chaque flux. Par exemple, le facteur de catégorisation pour le méthane attribué au réchauffement climatique est de sept et de sept millièmes pour formation la d'ozone photochimique. L'expression de l'impact sur le réchauffement climatique se faisant au moyen de l'indicateur de catégorie d'impact, le kg équivalent CO₂ et l'impact sur la formation d'ozone photochimique le kg équivalent C₂H₄ (Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, 2001b).

3.2.1. Attribution des flux aux catégories d'impacts

L'attribution des flux aux différentes catégories d'impacts a été réalisée selon les méthodes choisies pour élaborer cette étude. L'attribution pour les données provenant des FDES et PEP fut intégrée dans ces fiches. N'étant toutefois pas toujours communiquées dans les fiches, les méthodes ne seront donc pas divulguées dans ce travail. Toutefois, chaque fiche utilisée a été réalisée selon une norme ISO de la série 14000 ou une norme propre au pays du fournisseurs de la fiche qui découle de la norme ISO. Pour les flux traités au moyen du logiciel open LCA, l'attribution de ceux-ci est prise en charge dans les méthodes d'analyse du cycle de vie sélectionnées. Les règles d'attribution des flux ne seront pas décrites dans ce travail, toutefois, celles-ci sont consultables dans le document ci-joint (Hischier et al., 2010). Les méthodes choisies sont issues d'un pack réalisé par la société Ecoinvent à savoir « lcia methods » (Life Cycle Inventory assessment methods). Ecoinvent, basé en Suisse, fait figure de référence dans le domaine de l'analyse du cycle de vie. Les méthodes sélectionnées ont donc été considérées comme suffisamment fiable en fonction des exigences de la norme ISO 14040 et des exigences exprimées dans le champ de cette étude.

3.2.2. Catégorisation des flux dans les catégories d'impact

Lorsque chaque flux est attribué à une ou plusieurs catégories d'impacts, il est nécessaire de quantifier l'influence de chacun. Cette étape de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie est également comprise dans les méthodes du pack lcia methods. Les méthodes contiennent les données nécessaires à la catégorisation de chaque flux selon les catégories contenues dans chaque méthode. Le traitement de ces données est pris en compte par le logiciel open LCA. Les facteurs de catégorisation sont également disponibles dans le document référencé ci-après (Hischier et al., 2010) En ce qui concerne la catégorisation des flux pour les données issues des FDES et PEP, les différentes méthodes de travail indiquées pour les réalisations de ces fiches prennent en compte cette étape de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie.

3.2.3. Impacts environnementaux de la centrale de Chaudfontaine

L'attribution et la catégorisation de l'inventaire du cycle de vie appliquées à la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine installée sur le barrage Bacquelaine a permis de calculer l'impact environnemental selon les catégories d'impact précédemment sélectionnées. Les résultats sont repris dans le tableau ci-dessous et exprimés en fonction de l'unité fonctionnelle à savoir 1 kWh.

Tableau 5 : impact environnemental de la production d'un kWh par la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine sur le barrage Bacquelaine

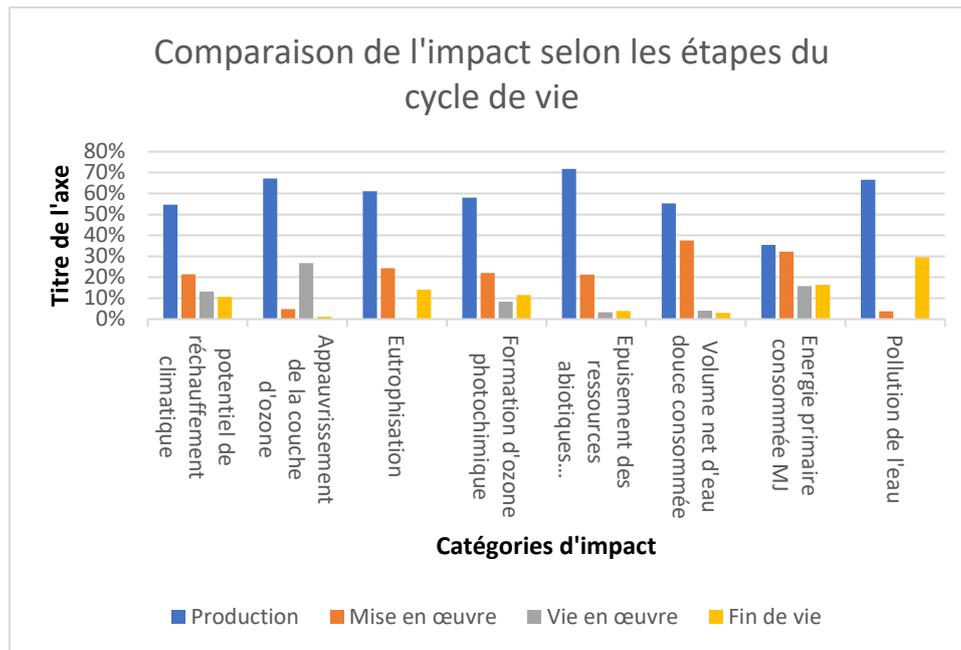
Potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
0,03083841	5,45588E-08	9,0628E-06	9,4646E-06	4,4398E-07	0,0002892	0,33970946	0,48668337

Cette présentation des résultats obtenus ne permet pas de se faire une bonne représentation de l'impact environnemental du produit. Ces résultats bien qu'étant le fruit des premières étapes de réalisation d'une ACV peuvent être considérés comme brut. La suite de ce travail va donc consister à les analyser et les interpréter. Tout d'abord, une analyse du produit sera effectuée en fonction des quatre étapes du cycle de vie et en fonction des cinq secteurs de la centrale. Les analyses apportées dans cette partie sont sommaires et synthétiques. L'analyse profonde de chaque impact est laissée au soin du futur utilisateur dans sa démarche d'amélioration et d'écoconception.

3.2.3.1. Analyse selon les étapes du cycle de vie

L'analyse selon les étapes du cycle de vie est un bon moyen pour identifier les étapes du cycle de vie les plus impactantes et vérifier les tendances générales liées au produit.

Pour une meilleure représentativité les résultats dans les graphiques sont exprimés selon un pourcentage. La première raison est que l'analyse du cycle de vie est un outil qui se base sur la comparaison, le rapport de pourcentage est donc particulièrement indiqué pour se représenter l'importance de chaque élément par rapport à ceux auxquels il est confronté. La deuxième raison réside dans la différence des ordres de grandeurs entre les différentes catégories d'impacts. La différence la plus notable est celle entre l'ordre de grandeur du kg éq CFC-11 et le kg éq 1-4 dichlorobenzène qui est de l'ordre de 10^8 . En effet, cette différence entraîne des difficultés à exprimer ces valeurs de manière claire. La troisième raison est l'absence de hiérarchie entre les catégories d'impacts. En effet, il n'existe pas de règle régissant l'importance des catégories les unes par rapport aux autres. La perception des impacts environnementaux est une sensation personnelle propre à chacun. Les exprimer de la même manière et ne pas leur donner de valeur absolue permet donc de les mettre sur le pied d'égalité et d'exprimer cette règle de l'analyse du cycle de vie.



Graphique 2 : comparaison de l'impact selon les étapes du cycle de vie.

Le graphique ci-dessus nous montre que la production est l'étape du cycle de vie la plus impactante pour toutes les catégories d'impacts. Dans ces conditions, nous pouvons affirmer que selon les catégories d'impacts choisies pour évaluer l'inventaire du cycle de vie, l'étape de production est la plus impactante pour l'environnement. Cette affirmation n'est bien sûr pas absolue et doit être nuancée par le fait que les catégories d'impacts prises en compte ne représentent qu'un échantillon du panel de catégorie d'impacts des différentes méthodes d'analyse du cycle de vie. On peut toutefois, noter que les catégories d'impacts prises en compte sont celles les plus souvent considérées dans les analyses du cycle de vie du même type (midpoint) (Jolliet et al., 2010).

- ✓ **Potentiel de réchauffement climatique** : le potentiel de réchauffement climatique est le plus important pour l'étape de production. Ceci peut s'expliquer par l'importante quantité de gaz à effet de serre rejeté durant les transports des matières premières. Malheureusement, l'agrégation des résultats ne permet pas de donner une valeur exacte de la part de transport des matières premières jusqu'au différents lieu de manufacture. Le secteur industriel bien que contraint à des quotas et des normes d'émissions est aussi responsable d'une bonne partie de ces GES en réalisant la production des différents sous-produits. Le potentiel de réchauffement climatique de la fin de vie est faible avec 10%. On peut expliquer ceci par l'hypothèse qui a été faite de ne pas prendre en compte le démantèlement du génie civil étant donnée sa durée de vie de cent ans et l'intrigue que représente le devenir du génie civil après les trente ans de durée de vie de la centrale. Si cette hypothèse a tendance à minorer l'impact du cycle de vie de la centrale, l'attribution de l'entièreté de l'impact à la production et à la mise en œuvre de la centrale a tendance à rectifier cette tendance. L'importance de la production pour le potentiel de réchauffement climatique peut être imputée au procédé industriel.
- ✓ **Appauvrissement de la couche d'ozone** : l'appauvrissement de la couche d'ozone est imputable pour la majeure partie (67%) à la production. Un résultat à noter est la part de 27% d'appauvrissement de la couche d'ozone pour l'étape de vie en œuvre. Cette étape faisant intervenir quasi exclusivement de l'énergie électrique pourrait nous indiquer que les émissions de substances ayant un impact sur la couche d'ozone sont principalement liées à la

consommation d'énergie électrique. Cette supposition est cependant affaiblie par le fait que les procédés industriels qui sont gardés par la confidentialité d'entreprise, ne sont pas connus. De plus, l'agrégation des résultats dans les FDES et PEP ne permet pas d'inventorier tous les flux responsables de l'appauvrissement de la couche d'ozone.

- ✓ Eutrophisation : La même remarque est également valable pour l'eutrophisation. Cet impact est principalement lié aux étapes de production et de mise en œuvre, or ceux-ci font intervenir le plus le transport dans le cycle de vie. La corrélation entre le transport et l'eutrophisation est donc envisageable. L'impact du transport sur l'eutrophisation est de $2.2 \cdot 10^{-4} \text{kg éq PO}_4^{3-} / (\text{t} \cdot \text{km})$ (Greendelta, n.d.).
- ✓ Formation d'ozone photochimique : les flux influençant le plus la formation d'ozone photochimique sont principalement à imputer à l'étape de production mais aussi dans une moindre proportion à l'étape de mise en œuvre. La formation d'ozone photochimique étant principalement due à l'émission de photo-oxydants, tels que les oxydes d'azote et composés organiques volatiles qui proviennent majoritairement du secteur du transport et de l'industrie, sont donc logiquement à imputer à l'étape de production.
- ✓ Epuisement des ressources abiotiques : encore une fois, l'étape de production est majoritairement responsable de l'épuisement des ressources abiotiques. Ce constat suit une logique implacable selon laquelle c'est durant cette étape que la majorité des flux de matières abiotique est consommée.
- ✓ Consommation d'eau douce : les procédés industriels ainsi que les procédés d'extraction des matières premières tels que les métaux rares nécessaires à la production des sous-produits technologique, sont certainement majoritairement responsables de la consommation d'eau.
- ✓ Energie primaire : l'énergie primaire est la catégorie d'impact la plus partagée entre les différentes étapes du cycle de vie. Cette répartition peut s'expliquer par les demandes en énergie de la mise en œuvre avec la manutention, l'excavation et les transports, et les demandes pour les sous-produits actifs fonctionnant durant la vie en œuvre.
- ✓ Pollution de l'eau : l'eau est la plus polluée durant l'étape de production. On peut faire la corrélation avec la consommation de l'eau douce qui est également majoritairement impactée par l'étape de production. Toutefois on notera l'impact de la vie en œuvre sur cette catégorie, la vie en œuvre étant caractérisée principalement par la consommation quasi exclusive d'énergie électrique.

La classification des impacts selon les étapes du cycle de vie nous montre donc où se trouve le plus gros potentiel de réduction de l'impact selon chaque catégorie d'impacts. En effet, diminuer de cinquante pour cent l'impact d'une étape sur une catégorie aura plus d'effets s'il s'agit de l'étape ayant le plus de d'impacts. Par exemple, la réduction de l'impact de la production sur la catégorie d'épuisement des ressources abiotiques réduira l'impact du produit de quarante-sept pourcents sur l'épuisement des ressources abiotiques. Tandis que de réduire de cinquante pourcents l'impact de l'étape de mise en œuvre sur la catégorie de l'épuisement des ressources abiotiques diminuera l'impact du produit de deux pourcents. Le plus grand potentiel de réduction des impacts se porte donc sur l'étape de production. MTBE s.a. n'ayant pas d'influence sur les différents procédés de production, son action pour l'éco-conception se portera donc sur le choix des sous-produits à utiliser.

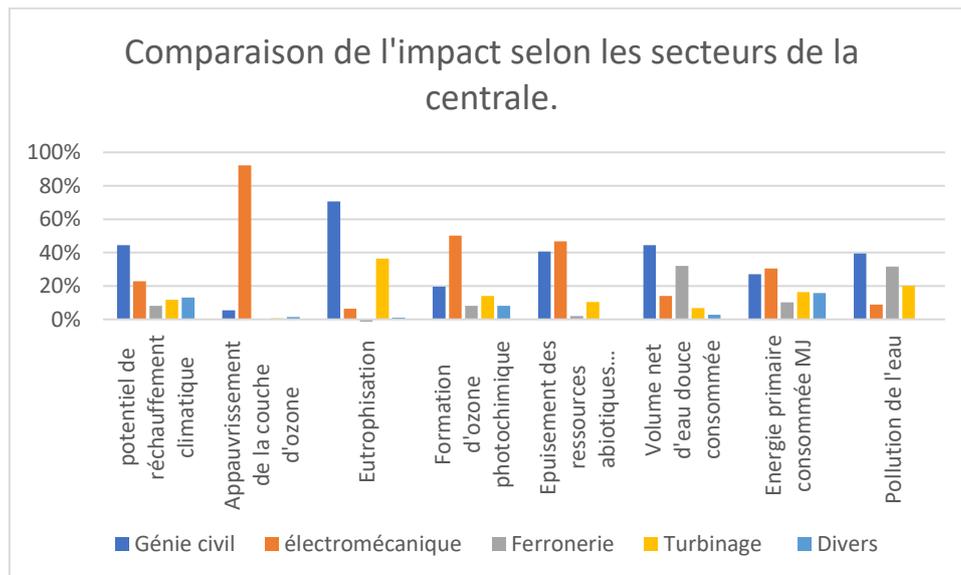
L'hypothèse que l'on peut aisément faire par rapport aux énergies renouvelable est ici bien respectée. En parlant d'énergie renouvelable, il est facile de s'imaginer que l'étape de cycle de vie de production est la plus impactante pour l'environnement selon l'analyse de cycle de vie. En effet, la production est l'étape du cycle de vie faisant intervenir le plus de processus reconnus comme fort

impactant pour l'environnement. Les processus de transport, industriels etc. interviennent le plus souvent dans les étapes de mises en œuvre et de production.

Enfin, au vu de la part de responsabilité de l'étape de production dans les impacts environnementaux, on peut affirmer que la production est pour l'avenir un investissement pour le respect de l'environnement.

3.2.3.2. Analyse selon les secteurs de la centrale hydroélectrique

L'analyse de l'inventaire du cycle de vie en fonction des secteurs de la centrale hydroélectrique permet d'identifier les secteurs les plus impactants selon chaque catégorie.



Graphique 3 : comparaison de l'impact selon les secteurs de la centrale.

A première vue, les secteurs du génie civil et de l'électromécanique sont les plus impactant pour l'environnement. En effet, le génie civil a le plus d'impacts dans trois catégories d'impacts et l'électromécanique dans cinq. Le génie civil est le plus impactant pour la consommation d'eau et la pollution de l'eau. Le secteur de l'électromécanique est quant à lui le plus impactant pour les catégories de potentiel de réchauffement climatique, d'appauvrissement de la couche d'ozone, d'eutrophisation, de formation d'ozone photochimique, d'épuisement de ressources abiotiques, de la consommation d'énergie primaire.

- ✓ Le génie civil : l'impact est majoritaire pour le génie civil dans trois catégories. L'eau est majoritairement impactée par le génie civil. Si on fait le rapprochement avec la comparaison en fonction de étapes du cycle de vie, on peut considérer que l'eau (consommation et pollution) est principalement impactée par la production du génie civil. Le génie civil étant principalement constitué de béton, un moyen efficace de réduire l'impact de la centrale sur les catégories de consommation et de pollution de l'eau serait d'agir sur le béton en réduisant la quantité ou en modifiant le process. Il faut toutefois faire attention à ne pas mettre en péril la solidité de l'ouvrage. Une rupture du béton aurait un impact écologique colossal en raison du coût environnemental de la réparation mais aussi des pertes de productions.
- ✓ L'électromécanique : l'électromécanique est le secteur ayant le plus grand impact dans la majorité des secteurs de la centrale. Si on peut certainement imputer l'impact majoritaire dans les catégories de potentiel de réchauffement climatique, d'appauvrissement de la couche d'ozone, d'eutrophisation, de formation d'ozone photochimique, d'épuisement de ressources abiotiques et de la consommation d'énergie primaire c'est certainement dû aux processus

industriels faisant intervenir des flux très variés auxquelles de grands facteurs de catégorisation ont été appliqués. Par exemple, les métaux rares utilisés dans l'industrie de la technologie.

- ✓ La ferronnerie : on peut expliquer la faible représentativité de la ferronnerie dans l'impact du cycle de vie par la faible masse de matériaux qu'elle intègre dans la centrale (environ dix tonnes). De plus, l'ensemble des flux de matières inhérents à la ferronnerie ne sont pas rares et utilisés à grande échelle.
- ✓ Turbinage : le turbinage a également un faible impact par rapport au reste de la centrale. Il faut également noter que la production de la boîte de vitesse est un processus élémentaire appartenant au secteur du turbinage mais qui a été exclu du système.
- ✓ Divers : le secteur divers est faiblement influant dans le cycle de vie de la centrale en raison du faible nombre de ses composants. Il faut toutefois noter que l'énergie primaire consommée est fort influante du fait que le convecteur et la bouche d'extraction sont très énergivores :(respectivement 2000 et 2500 W (Duschene, 2017)).

Tout comme la classification selon les étapes du cycle de vie, on peut se dire que le meilleur potentiel de réduction de l'impact selon chaque catégorie se trouve dans les secteurs les plus impactants. Toutefois, il faut prendre en compte le contexte entourant chaque sous-produit et processus élémentaire. Prenons l'exemple du secteur de l'électromécanique. Ce secteur est composé par bon nombre de produits issus de la société Schneider électrique. Or cette société est certifiée ISO 14001 (AFNOR, 2015). En possédant cette certification, la société Schneider nous informe que des optimisations environnementales ont déjà été réalisées autour de la production de leurs produits. Améliorer ce qui a déjà été amélioré ne sera donc pas l'approche la plus facile à réaliser. La prise de décisions dans l'optique de diminutions des impacts environnementaux ne se fera donc pas uniquement sur base des résultats de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie mais aussi sur base du contexte entourant chaque produit.

Le choix de MTBE s.a. qui se porte sur la compagnie Schneider comme fournisseur de la plupart des éléments électriques installés sur la centrale, peut donc être considéré comme une avancée environnementale des centrales hydroélectriques qu'elle installe. Cette constatation nous est donnée par l'analyse du cycle de vie. Si une analyse du cycle de vie permet d'identifier les points critiques ayant le plus d'impacts sur l'environnement, elle permet aussi de mettre en lumière les points positifs d'un point de vue environnemental. Si on combine le secteur de l'électromécanique principalement représenté par des produits Schneider et l'étape de production de ce secteur, il est très intéressant de savoir que cette combinaison ayant un impact important est régie par des règles de management du respect de l'environnement. Suite à cette remarque, il faut toutefois mettre en garde sur les résultats de l'inventaire du cycle de vie. En effet, dans cette analyse, certains sous-produits installés dans la centrale ont été remplacés par des produits de la marque Schneider. Cette marque possédant un fort engagement environnemental, la publication des profils environnementaux de leur gamme fut abondamment utilisée pour les produits installés mais aussi pour les produits similaires dont le profil environnemental n'était pas publiquement disponible et les données d'inventaire non-plus.

La tendance générale ressortant de l'analyse de l'inventaire du cycle de vie est que les impacts environnementaux sont les plus marqués dans l'étape de productions pour les secteurs du génie civil et de l'électromécanique. L'impact du génie civil peut s'expliquer par la charge pondérale qu'il représente par rapport à la centrale (plus ou moins cinq cent tonnes). L'impact du secteur de l'électromécanique peut s'expliquer premièrement par le besoin en matériaux spécifiques à la technologie qu'il emploie et aussi par le fait qu'il regroupe la majorité des sous-produits actifs (qui

consomme de l'énergie pour fonctionner). La forte domination de l'étape de production nous permet de conclure que si une centrale hydroélectrique est un investissement économiquement rentable, l'installation d'une centrale hydroélectrique par MTBE s.a. est un investissement environnemental également. La question de la rentabilité environnementale est toutefois moins évidente. Si la rentabilité d'un investissement économique est basée sur l'expansion de la valeur d'un capital, l'investissement environnemental ne permet pas de faire croître un bénéfice sur l'environnement mais plutôt de faire diminuer l'impact environnemental du processus sur lequel a été porté l'investissement. La rentabilité environnementale est donc une valeur relative de la réduction des impacts. Afin d'illustrer la relativité de l'investissement environnemental représenté par la centrale de Chaudfontaine, celle-ci sera comparée avec d'autres moyen de production d'énergie électrique.

3.2.4. Comparaison des systèmes de production d'énergie électrique

La production d'énergie électrique par la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine placée sur le barrage Bacquelaine sera donc comparée à plusieurs systèmes de production d'énergie électrique. Les systèmes choisis pour la comparaison sont issus des bases de données ELCD greendelta et NEEDS. Le fait de choisir ces bases de données comme source permet de traiter les données d'inventaire avec la même méthodologie que celle utilisée dans le cadre de cette analyse. L'outil d'analyse utilisé est le logiciel Open LCA. Le choix de ces outils d'analyse permet de renforcer la pertinence de ces comparaisons.

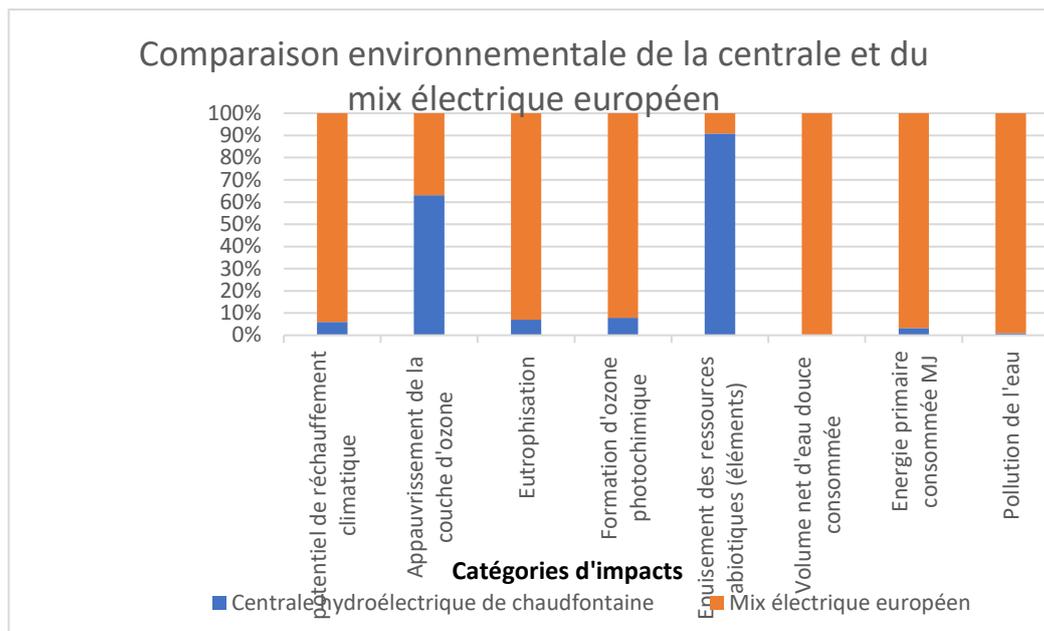
La comparaison des systèmes de production est basée sur la production d'un kWh électrique comme le préconise l'unité fonctionnelle.

Pour des raisons de représentativité l'impact cumulé des deux systèmes a été ramené à 1. Les valeurs exactes pour chaque impacte sont reprises dans les tableaux adjacents aux graphiques.

3.2.4.1. Comparaison avec le mix électrique européen.

Les données d'inventaire sont issues de la base de données ELCD greendelta et les méthodes d'analyse sont :

- ✓ CML pour les catégories d'impact de potentiel de réchauffement climatique, d'appauvrissement de la couche d'ozone, d'eutrophisation aquatique, de formation d'ozone photochimique, d'épuisement des ressources abiotiques et de pollution de l'eau ;
- ✓ Cumulative energy demand pour l'énergie primaire consommée ;
- ✓ ReCiPe midpoint pour la consommation d'eau ;



Graphique 4 : comparaison environnementale de la centrale et du mix électrique européen

Tableau 6 : comparaison environnementale de la centrale et du mix électrique européen (Greendelta, n.d.)

	potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Centrale	0,03083841	5,45588E-08	9,0628E-06	9,4646E-06	4,4398E-07	0,0002892	0,33970946	0,48668337
Mix électrique européen	0,48919	3,19E-08	0,00012	0,00011	4,43E-08	1,77	10,27323	49,97477

On peut s'apercevoir que l'impact du kWh produit par la centrale hydroélectrique est moins important pour six catégories d'impacts. L'intérêt environnemental de la centrale est marqué pour ces six catégories d'impacts. Les seuls impacts à être moins importants pour le mix européen sont l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'épuisement des ressources abiotiques. En regardant le graphique 3, on peut conclure que ces différences sont à imputer à l'électromécanique.

Pour information, la répartition du mix énergétique européen est reprise dans la figure ci-dessous. Cette figure reprend également la répartition des principaux systèmes qui seront comparés.

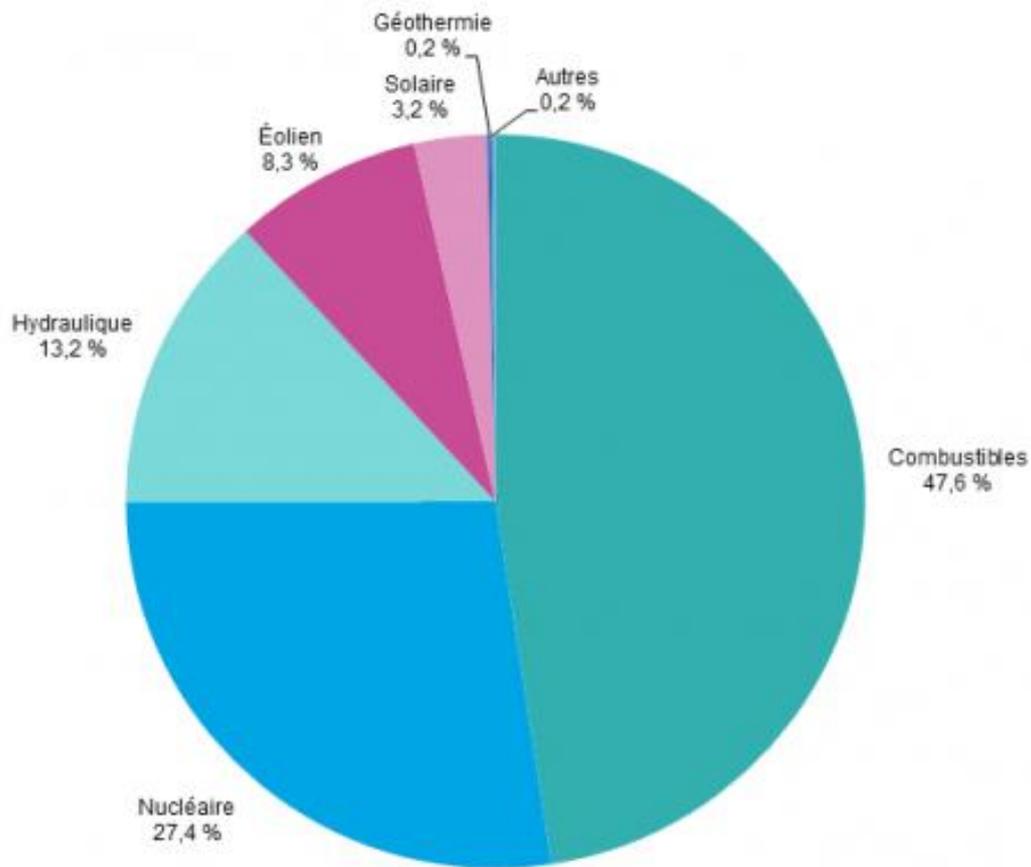


Figure 11 : mode de production d'électricité du mix énergétique européen. (eurostat, 2016)

La part d'énergie combustible est donc fort importante dans le mix énergétique européen. Cette constatation peut expliquer la différence de potentiel de réchauffement climatique. En effet, la production d'électricité au moyen d'énergie combustible présente un fort potentiel de réchauffement climatique dû aux réactions chimiques de combustions qui transforment le combustible en GES. La différence de consommation d'énergie primaire est due à l'utilisation des combustibles comme origine de l'énergie. Il faut toutefois noter que l'énergie potentielle gravifique servant à produire l'électricité via la centrale hydroélectrique n'est pas reprise dans l'inventaire de flux. La reprendre viendrait à effectuer l'opération suivante.

$$UF * 3.6 = 3.6 \text{ MJ}$$

$$3.6/0.75(\text{rendement de la centrale (Burton, 2017)}) = 4.8 \text{ MJ}$$

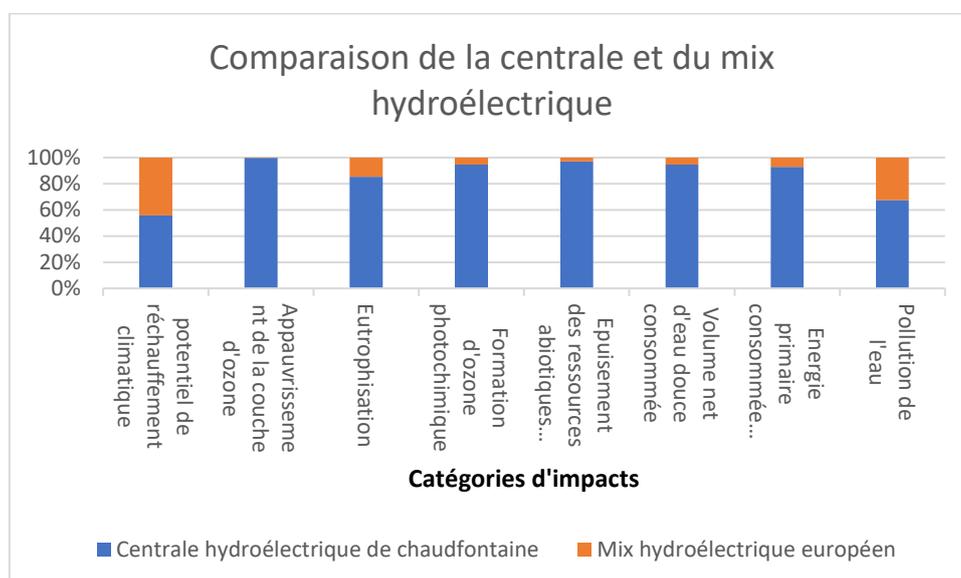
$$4.8 + 0.42 = 5.62 \text{ MJ}$$

On peut donc interpréter que le gain d'énergie primaire n'est pas uniquement dû à l'utilisation d'énergie renouvelable, mais aussi aux autres processus élémentaires annexes (infrastructures, transport des combustibles, etc.).

La connaissance limitée des différents procédés de fabrication représente une base insuffisante pour élaborer des hypothèses et conclusions supplémentaires.

3.2.4.2. Comparaison avec le mix hydroélectrique européen

L'électricité provient à mesure de 13.2% de l'hydraulique soit la plus grande part pour l'énergie renouvelable (eurostat, 2016). Pouvoir placer la centrale dans ce secteur de production est donc intéressant pour se rendre compte des spécificités de la centrale.



Graphique 5 : comparaison de la centrale et du mix hydroélectrique

Tableau 7 : comparaison de la centrale et du mix hydroélectrique.

	potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
Mix hydro	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Centrale	0,03083841	5,45588E-08	9,0628E-06	9,4646E-06	4,4398E-07	0,0002892	0,33970946	0,48668337
Mix hydroélectrique européen	0,0243	8,31E-11	0,00000154	0,000000547	1,37E-08	0,0000161	0,02537	0,2347

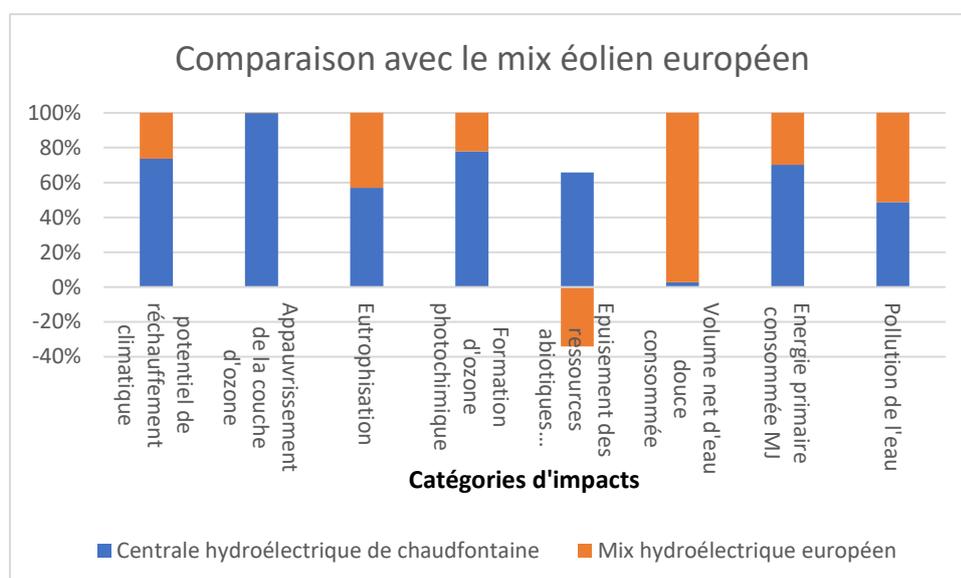
Le constat est assez net et il est facile de s'apercevoir que la centrale est plus impactante pour l'ensemble de catégories traitées dans cette analyse. On peut émettre l'hypothèse de l'économie d'échelle pour la production. En effet, en terme de puissance la centrale hydroélectrique est très puissante en comparaison aux barrages hydroélectriques alpins qui sont de l'ordre du multi-mégawatt. De plus, les centrales considérées ont une durée de vie estimée à soixante ans.

Un résultat intéressant à noter est tout de même la plus faible différence pour le potentiel de réchauffement climatique. La moins grande différence pour la catégorie du potentiel de réchauffement climatique peut être lié au fait que les échanges gazeux se produisant dans les retenues d'eau des barrages. En effet, l'analyse du cycle de vie des barrages hydroélectrique prend en compte les émissions de GES dans les frontières du système. Ce flux peut ne pas être négligeable selon le niveau de pollution de l'eau (Le Monde.fr, 2010) .

Une étude comparant les différents types de production hydroélectrique a été réalisée pour le territoire européen (Flury & Frischknecht, n.d.). Cette étude fut réalisée en Suisse et prend en compte les centrales avec retenue d'eau, les centrales aux cours de l'eau, les centrales de pompage turbinage

et les petites centrales hydroélectriques. La consommation d'énergie primaire pour les centrales au cours de l'eau en Europe est de 0.041 MJ/kWh produit (cette donnée exclut l'énergie potentielle gravifique de l'eau qui est à l'origine de la production d'électricité) (Flury & Frischknecht, n.d.). Si on compare cette donnée avec la demande pour le mix hydroélectrique européen, on peut conclure que les centrales hydroélectriques au cours de l'eau ont une demande plus importante que les autres centrales hydroélectriques. Si maintenant on compare cette donnée avec la centrale de Chaudfontaine, qui donne un ratio de 8,3 (0,34/0,041) on peut se demander d'où vient cette différence. On peut émettre l'hypothèse du lien avec la puissance installée et l'économie d'échelle au niveau de la production. En effet, la moyenne des puissances des centrales étudiées est de 8.6 MW (Flury & Frischknecht, n.d.). Le ratio de puissance est donc de 172 (8.6/0.05).

3.2.4.3. Comparaison avec le mix éolien européen



Graphique 6 : comparaison avec le mix éolien européen (Greendelta, n.d.)

Tableau 8 : comparaison de la centrale et du mix hydroélectrique européen

Mix hydro	potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 ₃₋	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Centrale	0,03083841	5,45588E-08	9,0628E-06	9,4646E-06	4,4398E-07	0,0002892	0,33970946	0,48668337
éolien mix européen	0,01104	3,77E-11	0,00000682	0,0000027	-0,00000023	0,01	0,1447	0,513

La première donnée interpellante dans ce graphique est le résultat de la catégorie d'impact de l'épuisement des ressources abiotiques. En effet, elle est négative. Ce résultat négatif peut être justifié par l'inventaire du cycle de vie du mix éolien.

Tableau 9 : comparaison de la centrale et de l'éolien offshore 160 MW

	potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Épuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Centrale	0,02854078	5,4164E-08	6,4322E-06	8,7159E-06	4,0763E-07	0,05414316	0,31192966	0,59909919
éolien offshore 160 MW	0,00748	3,79E-10	4,909E-10	0,000002484	9,6667E-07	0	0,10869	5,95

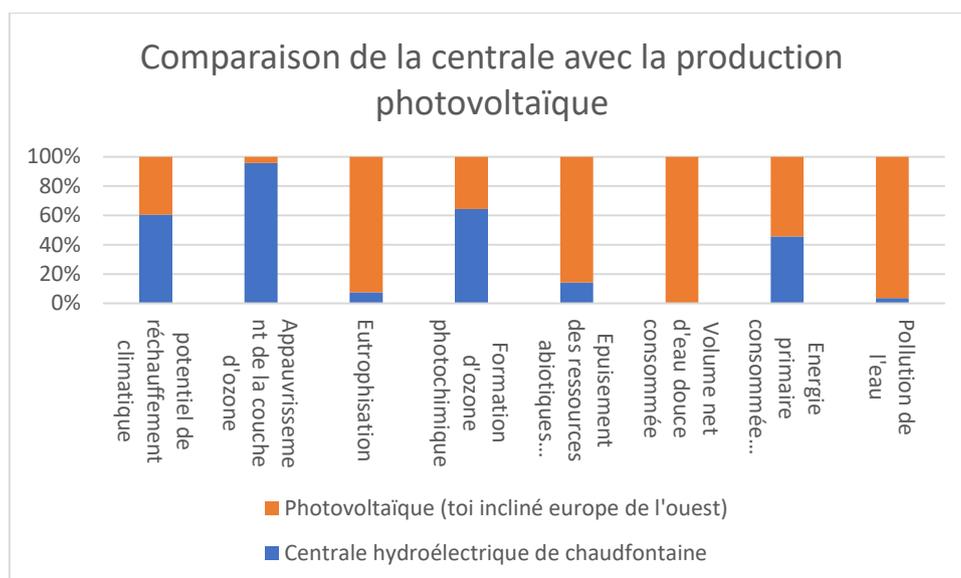
On peut voir dans cette comparaison que l'éolien est moins impactant pour toutes les catégories sauf pour l'épuisement des ressources abiotiques et la pollution de l'eau. L'épuisement des ressources abiotiques peut être hypothétisées par la nature des composantes d'une éolienne. De plus, l'implantation offshore demande une grande quantité de ressources minérale pour l'implantation en mer. La comparaison avec le mix éolien européen confirme l'impact sur l'épuisement des ressources abiotiques. De plus, les matériaux utilisés pour les éoliennes offshore doivent être certainement plus résistants en raison de la force imposée par le vent et de la taille des éoliennes. L'augmentation de cette résistance peut se réaliser soit en augmentant la quantité de matériaux, soit en utilisant des matériaux plus performant en matière de résistance mécanique. On pourrait opposer à cette hypothèse le fait que dans ces conditions, la production augmente et donc que le bilan pour 1 kWh serait nul. Toutefois, il ne faut oublier le rendement et la théorie de Betz qui dit qu'une éolienne ne peut transformer plus de 59% de l'énergie cinétique du vent. La force appliquée par le vent étant directement proportionnelle à sa vitesse et l'énergie produite possédant un coefficient de proportionnalité de 0.59 dans un modèle théorique optimale, la résistance des matériaux doit augmenter avec un coefficient de 1.69. Dans cette remarque, le rapport de proportionnalité entre la résistance et la quantité de matériaux n'est pas pris en compte car non connue. Cette hypothèse vient par contre affaiblir celle de l'économie d'échelle appliquée à la production. Toutefois, il faut noter que l'énergie éolienne est basée sur l'énergie cinétique du vent tandis que l'énergie hydraulique étudié dans la centrale est basée sur l'énergie potentielle gravifique. La théorie de Betz ne s'applique donc pas aux centrales fonctionnant au cours de l'eau.

La forte pollution de l'eau est certainement due à l'implantation en mer des éoliennes avec une pollution localisée.

Dans le graphique ci-dessus, la consommation d'eau a été retirée car son ordre de grandeur ne permettait pas une bonne représentation dans le graphique. Cette valeur est négative et très grande, en effet, elle est de -390 m³ (Greendelta, n.d.). Il s'agit de l'eau de refroidissement des turbines. La valeur négative est expliquée par l'hypothèse selon laquelle l'eau de refroidissement est fortement chargée en sel (éolien offshore) et son échauffement la désalinise par le passage de la phase liquide à la phase gazeuse. Cette hypothèse possède un élément de confirmation « *Dans les tours de refroidissement, l'eau condensée est pure* » qui nous est fournis par (BWT, 2017). Il faut noter que l'eau douce produite est alors importée ou alors rejetée sous forme de vapeur dans l'atmosphère, un rejet de l'eau douce dans la mer entrainerait un bilan nul. Toutefois, la valeur reste difficilement explicable. Enfin, comme pour l'hydraulique, les autres impacts plus faibles sont expliqués par l'économie d'échelle.

3.2.4.4. Comparaison de la centrale avec le photovoltaïque

Le système comparé est ici le mix du parc photovoltaïque européen. L'hypothèse d'ensoleillement est de 900 kWh/an (Greendelta, n.d.) en Europe centrale et de l'ouest. Ce système fut choisi par rapport à la localisation de la majorité de l'activité de MTBE s.a. qui est l'Europe de l'ouest. Les panneaux sont des panneaux inclinés.



Graphique 8 : comparaison de la centrale avec le photovoltaïque (Greendelta, n.d.)

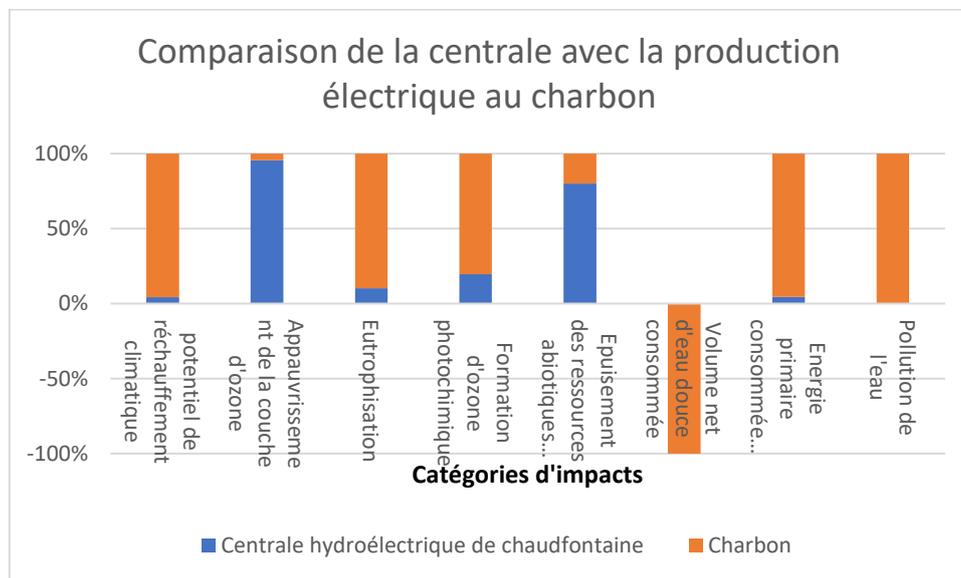
Tableau 10 : comparaison de la centrale avec la production photovoltaïque (Greendelta, n.d.)

	potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
PV	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Centrale	0,03083841	5,45588E-08	9,0628E-06	9,4646E-06	4,4398E-07	0,0002892	0,33970946	0,48668337
PV toit incliné	0,02019	2,34E-09	0,00011	0,00000521	0,00000267	2,12397	0,40311	13,28161

La centrale hydroélectrique possède un résultat environnemental mitigé par rapport au photovoltaïque. En effet, l'eutrophisation, l'épuisement des ressources abiotiques, le volume net d'eau douce, et la pollution de l'eau sont plus importants pour le photovoltaïque. L'épuisement des ressources abiotiques peut s'expliquer par la nature des matériaux, le volume net d'eau douce consommée est certainement dû au nettoyage des panneaux pour qu'ils gardent une efficacité maximale et la pollution de l'eau est certainement due au nettoyage mais aussi au procédé industriel de fabrication et de démantèlement. Il faut toutefois noter que les procédés de démantèlement représentent encore une interrogation pour le futur.

3.2.4.5. Comparaison de la centrale avec la production électrique au moyen de charbon

Le système comparé ici est une centrale au charbon de 450 MW européenne dans un scénario réaliste optimiste pour 2025. Ce système fut choisi car il s'agissait du plus plausible au niveau du champ de l'étude et des données d'inventaires.



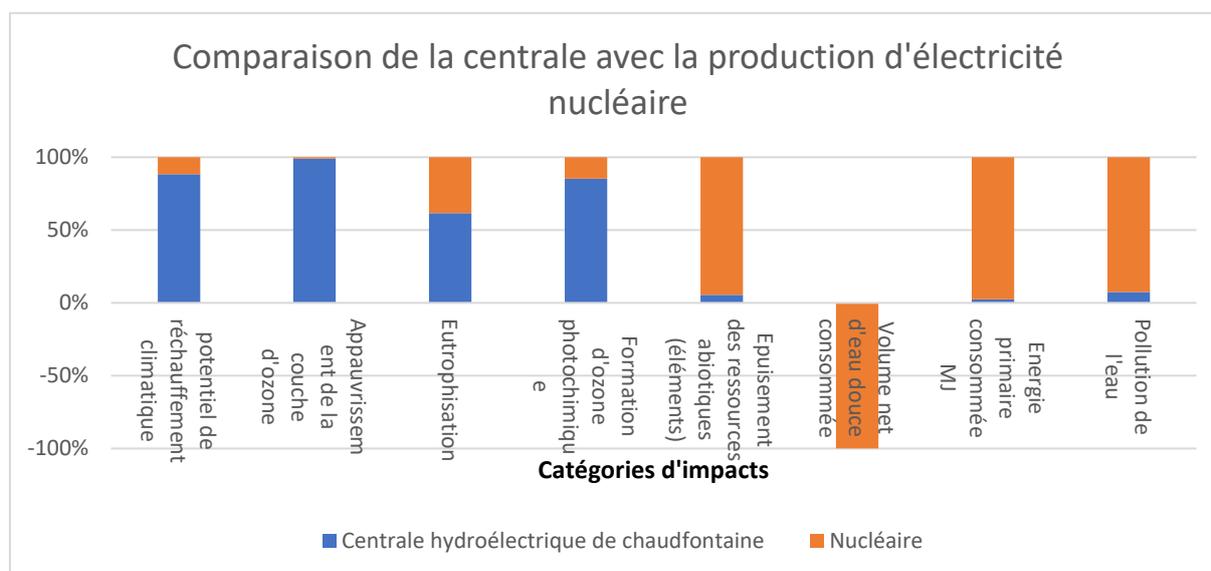
Graphique 9 : comparaison de la centrale avec la production électrique au charbon (Greendelta, n.d.)

Tableau 11 : comparaison avec la production électrique au charbon (Greendelta, n.d.)

	potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Centrale	0,03083841	5,45588E-08	9,0628E-06	9,4646E-06	4,4398E-07	0,0002892	0,33970946	0,48668337
charbon	0,70155	2,51E-09	0,000080	0,000038	1,109E-07	-1,895	7,10369	258,3064

Les résultats les plus marquants sont la différence avec le potentiel de réchauffement climatique et l'énergie primaire. On peut attribuer cela à la combustion du charbon qui relâche beaucoup de gaz à effets de serre et au fait qu'il ne s'agit pas d'énergie renouvelable pour la demande en énergie primaire. La formation d'ozone également peut être imputée à l'émission des gaz de combustion dans l'atmosphère. Le volume net d'eau négatif est dû au fait que l'eau est utilisée pour le refroidissement (Greendelta, n.d.) ce qui désalinise l'eau par évaporation à l'instar des éoliennes offshore.

3.2.4.6. Comparaison de la centrale avec la production d'électricité nucléaire



Graphique 10 : comparaison de la centrale avec la production d'électricité nucléaire (Greendelta, n.d.)

Tableau 12 : comparaison avec la production d'électricité nucléaire (Greendelta, n.d.)

	potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
Nucléaire	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Centrale	0,03083841	5,45588E-08	9,0628E-06	9,4646E-06	4,4398E-07	0,0002892	0,33970946	0,48668337
Nucléaire	0,00409	5,01E-10	0,00000564	0,00000163	0,00000756	-4,96	13,04745	6,0557

On peut remarquer que les trois impacts significatifs du nucléaire sont l'épuisement des ressources abiotique certainement dû à la consommation d'énergie nucléaire qui est une ressource rare, la consommation d'énergie primaire certainement due à la difficulté de la maîtrise du procédé de production mais surtout au coût énergétique du traitement des déchets nucléaires et la pollution de l'eau. De plus, cette analyse du cycle de vie de l'énergie nucléaire souffre de l'incertitude liée au traitement des déchets nucléaires.

La consommation d'eau négative est encore liée au fait de l'utilisation d'eau de refroidissement et de son évaporation.

On peut voir que l'énergie nucléaire est moins impactante pour toutes les catégories de ce graphique sauf pour la pollution de l'eau. On peut imputer cela à l'utilisation de l'eau dans les centrales. Eau qui est contaminée par la pollution nucléaire. Le faible impact des autres catégories doit être imputé aux réactions nucléaires qui sont peu polluantes et à la puissance des centrales qui permet de réaliser une économie environnementale d'échelle.

3.2.5. Conclusion

Cette comparaison a permis de se rendre compte que la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine ne possède pas un impact environnemental très favorable par rapport à la production

hydroélectrique européenne globale. La principale hypothèse retenue est que la centrale pêche par sa taille. En effet, avec une puissance nominale de 50 kW elle ne bénéficie pas de l'économie environnementale d'échelle que l'on peut hypothétiser.

En ce qui concerne l'épuisement des ressources abiotiques, on peut voir que lorsque les moyens de productions n'utilisent pas de ressources considérées comme rares en grande quantité, l'impact du système étudié ici est plus important. Par contre, lorsque des ressources plus rares sont utilisées, comme l'uranium pour l'énergie nucléaire, l'impact sur les ressources abiotiques est plus important.

Par rapport aux énergie non renouvelables, on peut se réjouir du moindre impact de la centrale sur le potentiel de réchauffement climatique et de l'énergie primaire consommée.

La brève analyse ci-dessus sert juste à donner des pistes de réflexions pour l'explication des différences constatées. L'utilisation des résultats est donc laissée aux futurs utilisateurs de cette analyse du cycle de vie.

3.3. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats englobe l'ensemble de l'analyse du cycle de vie. Cette partie de l'analyse s'insère donc à tous les niveaux de l'analyse. L'objectif de cette partie est de mettre en lumière les points remarquables relevés durant cette analyse du cycle de vie de la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine installée sur le barrage Bacquelaine. Il est primordial de noter que les interprétations suivantes ont été réalisées en fonction de la définition des objectifs et du champ.

3.3.1. Le contexte de l'analyse

L'analyse ici présente fut commanditée par le bureau d'étude MTBE s.a. La place de MTBE s.a. dans les projets d'hydroélectricité le long des cours d'eau est celle de maître d'œuvre. L'équipe qui compose le bureau d'étude est donc intégrée à l'ensemble des démarches nécessaires à la réalisation des projets. Le fait d'être entouré par cette équipe tout au long de la réalisation de l'analyse fut d'une grande aide et même une condition nécessaire à la réalisation de l'étude. L'expertise apportée par chaque membre du bureau d'étude fut donc intégrée à cette analyse. Outre l'équipe d'experts du bureau d'étude, la proximité accrue avec le maître d'ouvrage fut précieuse dans l'inventaire du cycle de vie. En effet, le maître d'ouvrage de la centrale de Chaudfontaine est étroitement lié au bureau d'étude MTBE s.a. en tant que société sœur du bureau d'étude. Le maître d'ouvrage, à savoir Hydro B est une filiale de la société Merytherme qui est la société mère de MTBE s.a. L'échange de données fut donc facilité pour l'intérêt commun que représente cette étude pour les deux parties. On peut donc allouer une fiabilité accrue aux résultats d'inventaire fournis par ces acteurs de la centrale hydroélectrique. Il faut toutefois noter que la fiabilité de ces données souffre tout de même des imprévus liés au hasard tels que les casses mécaniques et les imprévus météorologiques.

L'analyse du cycle de vie a répertorié cinquante et un sous-produits et processus élémentaires. L'inventaire du cycle de vie fut réalisé de manière classique selon la norme ISO 14040 pour certains des sous-produits et processus élémentaires. Pour les autres, le même traitement n'a pas pu être appliqué en raison des obstacles (confidentialité d'entreprise et allocation de ressources pour la communication de ces résultats) se dressant à l'application de la méthodologie proposée par la norme ISO 14040. Il a donc fallu adapter cette méthode et trouver des méthodes alternatives pour analyser le cycle de vie. L'adaptation de la méthode a donc engendré une variabilité des résultats qui a été minimisée par le traitement des données pour leur adaptation au cas étudié.

3.3.2. Représentativité des résultats obtenus

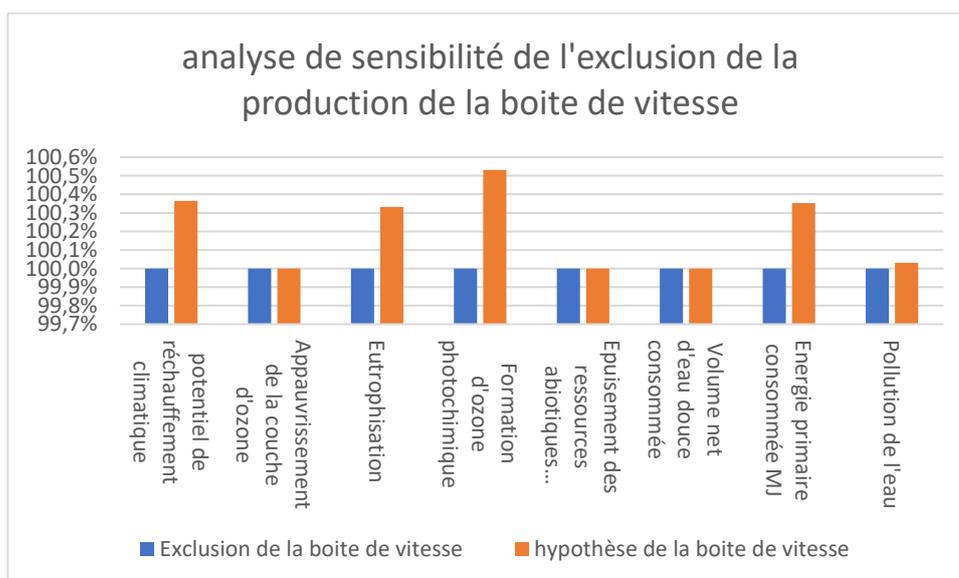
La présente étude possède donc comme objectif l'établissement de l'impact environnemental de la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine. Il s'agit donc d'un cas spécifique pour lequel l'ensemble des données devraient être reprises et adaptées au système évalué. Cependant, ce ne fut pas le cas, un bon nombre de données sont issues d'hypothèses, de données généralisées et d'estimations. L'utilisation de ces données qui ne sont pas exclusives au cas de la centrale étudiée représente donc un manque de rapprochement par rapport à la réalité. Toutefois, dans les conditions de réalisation de l'étude, il n'était pas possible d'obtenir des résultats issus uniquement d'observations et de mesures liées au cas concret de la centrale. Les conditions temporelles de l'étude prévue du mois de février 2017 au mois d'août 2017 ne représentent qu'une petite partie de la durée de vie de la centrale et en plus une étape de vie qui n'est pas critique dans son cycle. Il est fort à parier que si l'étude s'était déroulée durant la phase de production, les approximations liées à cette phase seraient diminuées de manière significative. Il en va de même pour les autres étapes du cycle de vie. On pourrait donc dire qu'un moyen efficace pour lever les approximations liées à l'inventaire du cycle de vie serait de réaliser l'étude sur une durée équivalente à la durée de vie de la centrale. Cependant, dans ces

conditions, l'analyse du cycle de vie perdrait son essence en qualité d'outil d'aide à la décision et son attrait lié à ses capacités de prévisions des impacts du cycle de vie.

De plus, un des objectifs de cette analyse du cycle de vie est de créer une base permettant d'informer les clients potentiels de MTBE s.a. sur l'impact environnemental des produits proposés par la société. La centrale de Chaudfontaine a donc été choisie en partie pour la représentativité qu'elle apporte par rapport aux centrales hydroélectriques réalisées jusqu'ici. La standardisation apportée à ce travail est donc un atout pour l'atteinte des objectifs de l'analyse.

3.3.3. Représentativité du système étudié

Comme relaté dans la section « traitement des données manquantes », certains processus ont été exclus du système en raison d'un manque de données remplissant les exigences qui ont été appliquées aux données pour leur utilisation. Du système, trois sous-produits (le groupe oléo-hydraulique, le frein et l'actuateur de vanne) et un processus élémentaire (la production de la boîte de vitesse) ont été exclus. Toutefois, la centrale hydroélectrique est un système faisant intervenir un grand nombre de sous-produits et de processus élémentaires. De plus, les éléments exclus bien qu'indispensables au fonctionnement de la centrale à long terme ne sont pas les éléments les plus remarquables au niveau de la centrale. Si on prend en considération la boîte de vitesse dont la masse est de 1055 kg (Flender Siemens, 2010) qui est constituée presque exclusivement de métal et que l'on prend les autres éléments métallique, en appliquant une analyse de sensibilité en fonction de la masse on peut s'apercevoir que l'exclusion du processus de production de la boîte de vitesse est négligeable. La plus grande différence enregistrée est pour la catégorie de la formation d'ozone photochimique. L'ordre de grandeur des différences est de 10^{-3} . Toutefois, l'analyse de sensibilité a été réalisée sur la seule donnée d'inventaire connue, à savoir la masse de métal. L'impact réel doit certainement être plus important. Toutefois, la plus petite différence observée dans la comparaison avec les autres systèmes de production d'électricité est de 4% pour l'impact sur la consommation d'énergie primaire par l'énergie photovoltaïque soit quatorze fois la différence observée suite à l'analyse de sensibilité.



3.3.4. Représentativité du cas étudié par rapport aux références de MTBE s.a.

Si la centrale de Chaudfontaine a été choisie comme cas d'étude, c'est non seulement pour des raisons pratiques liées à sa position géographique, mais aussi pour la représentativité qu'elle possède par rapport aux différents projets déjà réalisés par MTBE s.a.

Premièrement, la centrale de Chaudfontaine est équipée d'une turbine à vis d'Archimède. Le potentiel de cette technique et les avantages qu'elle procure font que cette technologie est celle qui est la plus installée par le bureau d'études à l'heure actuelle et qui possède le plus de potentiel pour le futur (Burton, 2017).

Deuxièmement, les caractéristiques topographiques du site sont représentatives de la plupart des sites faisant l'objet de la réalisation d'une centrale. La hauteur de chute de 1,4 m et le débit nominale de 5.5 m³/s d'eau possède une bonne représentativité du panel de références que possède MTBE s.a. (Burton, 2017)

Troisièmement, les dispositifs accompagnant le turbinage tels que la passe à poisson et le dégrilleur sont présents dans la plupart des centrales.

Cette analyse est donc suffisamment représentative de l'activité de MTBE s.a. Toutefois, les informations relayées par cette étude ne sont pas directement applicables pour l'analyse du cycle de vie de chaque projet réalisé par MTBE s.a. L'installation d'une centrale est soumise à un cahier des charges qui est établi en fonction des caractéristiques du site. Pour illustrer ce propos, deux exemples probants existent dans les références et projets de MTBE s.a.

- ✓ La centrale hydroélectrique de Monceau :
 - Installée sur la Sambre
 - Hauteur de chute : 4.6 m
 - Puissance nominale : 606 kW
 - Débit d'équipement : 18 m³/s
 - Productible escompté : 2 200 000 kWh

Le projet de Monceau est caractéristique en raison d'une imposition appliquée pour la prévention du risque d'inondation. Le risque d'inondation en amont de la centrale est minimisé par le fait que la centrale est amovible. En effet, la centrale doit pouvoir en cas de crue être retirée du cours d'eau afin de ne plus obstruer l'écoulement de l'eau. Pour satisfaire à cette exigence, un dispositif de levage de la centrale a été construit.



Figure 13 : centrale de Monceau levée (Rutten, 2017)



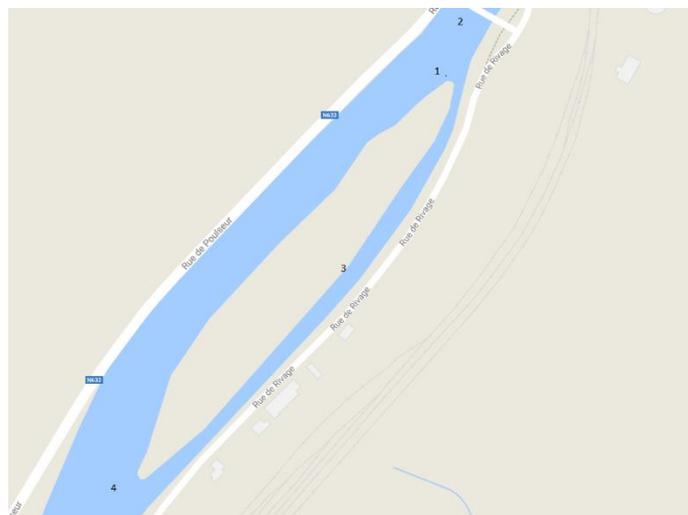
Figure 14 : centrale de Monceau abaissée

On peut voir sur ces photos les deux arches de levage de la centrale. Il est clair que l'impact environnemental de ces deux dispositifs n'est pas négligeable. On ne peut cependant pas le quantifier en raison du manque de données disponibles sur l'inventaire du cycle de vie de ces dispositifs. L'analyse du cycle de vie ici présent n'est donc pas adaptée à ce projet.

- ✓ Le projet de Chanxhe :
 - Débit d'équipement : 20 m³

- Hauteur de chute : 2.5 m
- Puissance : 400 kW

Ce projet est caractérisé par un bras d'eau reliant le niveau amont et le niveau aval faisant office de dispositif assurant la continuité écologique. Dans ce projet, la spécificité consistera donc en l'absence de passe à poisson.



Légende :

1. Emplacement de la centrale
2. Aval
3. Bras reliant l'amont et l'aval
4. Amont

La configuration du site permet donc de ne pas construire une passe à poisson. Dans le projet de Chaudfontaine, la passe à poisson représente 12 % du volume de béton installé. Si on se réfère à ce rapport pour calculer l'impact de la passe à poisson, celui sera de :

Tableau 13 : tableau reprenant l'impact de la passe à poisson de Chaudfontaine (les indicateurs ne sont pas ramenés à l'unité fonctionnelle)

	Potentiel de réchauffement climatique	Appauvrissement de la couche d'ozone	Eutrophisation	Formation d'ozone photochimique	Epuisement des ressources abiotiques (éléments)	Volume net d'eau douce consommée	Energie primaire consommée MJ	Pollution de l'eau
	kg éq CO2	kg éq CFC-11	kg éq PO4 3-	kg éq C2H4	kg éq Sb	m ³	MJ	kg éq 1-4 dichlorobenzène
Production	63262,46	0,00232424	19,1805288	3,4795188	0,0893396	309770,371	71378,9107	2155726,8
Mise en œuvre	109,179924	1,396E-07	0,3713316	0,10443228	0,02182394	3,27633E-05	4582,398	1034,03559
Vie en œuvre	0	0	0	0	0	0	0	0
Fin de vie	0	0	0	0	0	0	0	0

3.3.5. Utilisations des ressources gratuites

L'élaboration de cette analyse du cycle de vie a été rendue possible grâce à la gratuité des ressources de données traitant du cycle de vie de la centrale hydroélectrique. La contrainte établie dans les objectifs et le champ qui était de minimiser les coûts ne permettait pas d'obtenir les outils de

pointe du domaine de l'analyse du cycle de vie. Cette contrainte est donc un obstacle à la qualité et à la finesse de l'analyse. Il est toutefois très intéressant de noter que l'analyse du cycle de vie pour un produit relativement complexe n'est pas réservée à un secteur professionnel spécialisé et que l'écoconception est ouverte à un large public.

3.3.6. L'utilisation des FDES et PEP

Une grande partie de ce travail est basé sur la publication de FDES et PEP par des organismes de production des sous-produits utilisés dans cette centrale. En effet, le travail que représente ces fiches, a été d'une importance capitale et une condition nécessaire à la réalisation de ce travail. Si l'adaptation des données d'impact n'a pas toujours été possible étant donné l'agrégation importante des résultats, il est tout de même intéressant de noter que le niveau de détail et la précision des résultats est augmenté par le fait que l'organisme ayant publié les FDES et PEP est l'organisme producteur de ces produits. De cette manière, les obstacles de confidentialité d'entreprise et d'allocation de ressources sont surmontés. De plus, la connaissance accrue des différents procédés de fabrication est un atout pour l'exactitude des résultats d'inventaires du cycle de vie et donc de son analyse.

Les normes encadrant les FDES et PEP définissent les méthodes d'évaluation qui doivent être appliquées pour la réalisation d'une fiche. Si ces méthodes ne sont pas toujours précisément décrites dans les fiches, l'indication sur l'encadrement de la réalisation des fiches donne quelques informations sur les méthodes. Premièrement, les méthodes utilisées se basent sur des processus environnementaux connus et reconnus par la majorité de la communauté scientifique. Il y a donc une continuité entre les méthodes utilisées pour l'élaboration des FDES et PEP et les trois méthodes utilisées pour l'évaluation de l'impact environnemental via le logiciel Open LCA (CML, Cumulative Energy Demand et ReCiPe). De plus, la continuité des méthodes fut augmentée par les choix portant sur les catégories d'impacts. En effet, l'agrégation des résultats présentés dans les FDES et PEP ne permet pas de modifier les catégories d'impact pour les sous-produits décrits. Il a donc fallu adapter les catégories d'impacts en fonction de celles présentes dans les FDES et PEP. Une certaine continuité existe donc entre les méthodes des FDES et PEP d'une part et CML, CED et ReCiPe d'autre part.

On pourrait toutefois émettre des doutes quant à l'honnêteté des résultats étant donné le manque d'impartialité du publieur des fiches et donc l'utilisation de ces fiches comme argument de vente mais ce doute est totalement ou en partie levé par le mécanisme de revue qui est imposé par les normes méthodologiques. Les normes imposent en effet une revue des fiches par un organisme indépendant si celles-ci sont destinées à une publication sans restriction.

Enfin, on peut donc conclure que le fait d'utiliser ces fiches augmente la fiabilité des résultats mais diminue l'adaptation des résultats au cas étudié.

3.3.7. Impact du statut du réalisateur de l'analyse du cycle de vie

Cette analyse du cycle de vie fait l'objet d'un travail de fin d'étude pour l'obtention d'un diplôme universitaire en science et gestion de l'environnement à finalité énergie renouvelable et développement durable. Il est donc le fruit du travail d'un étudiant qui bien qu'orienté vers une filière en science de l'environnement, ne possède pas une expérience accrue forgée par des années de travail dans le domaine. En tant que première élaboration d'une analyse du cycle de vie, celle-ci fut laborieuse et fastidieuse. Il est fort à parier que l'expérience acquise durant la réalisation de ce travail permettrait au réalisateur d'obtenir une meilleure efficacité dans le domaine et donc pour un délai équivalent, des résultats de meilleure qualité.

3.3.8. Importance du volet informatif

Le contexte de l'entreprise commanditaire de cette analyse va influencer l'utilisation qui sera faite de cette analyse. La clientèle de MTBE s.a. se divise selon deux catégories.

Premièrement, une partie de la clientèle fait référence aux organismes privés (entreprise ou personne physique) qui veulent exploiter un potentiel d'énergie hydraulique. La principale raison de la sollicitation par cette catégorie de clients est donc liée aux opportunités d'exploitation d'un site qui sont représentées par la configuration du site (hauteur de chute et débit d'eau). Les caractéristiques du site exploitable le rendent donc adapté uniquement à l'installation d'une centrale hydroélectrique le long d'un cours d'eau. La décision pour ce site ne portera donc pas sur le type d'énergie renouvelable à exploiter. Par contre, un choix pourrait être porté sur le type de turbine à installer. Si ce choix est principalement axé sur la rentabilité du projet, l'analyse du cycle de vie des différentes turbines pourrait permettre d'intégrer à la décision le volet environnemental. L'objectif d'outil d'aide à la décision pour l'écoconception de l'analyse de cycle de vie serait donc renforcé par une analyse du cycle de vie des différentes technologies de turbinage pour les centrales hydroélectriques de faibles hauteurs de chute. On pourrait alors penser qu'une analyse intégrant uniquement le cycle de vie de la turbine serait suffisant, toutefois, ce choix de turbine engendre des modifications dans la conception de la centrale. L'analyse devrait donc intégrer le cycle de vie de chaque centrale dans son ensemble.

Deuxièmement, la catégorie de clients représentée par les organismes publics agit plus en fonction d'une politique énergétique qui régit le territoire représenté par l'organisme public demandeur. Si on considère l'échelle géographique du territoire concerné, la comparaison entre les différents types d'énergies renouvelables pourra être réalisée sur base de cette analyse pour de petites échelles (par exemple, un bourgmestre voulant exploiter un site appartenant à sa commune). Par contre, une décision pour l'établissement d'une politique énergétique sur une plus large échelle devrait se réaliser sur base d'analyses de cycle de vie auxquelles des moyens plus importants seraient alloués (outils d'analyse, qualification du réalisateur de l'analyse, influence plus importante sur les différents acteurs).

Cette analyse en l'état actuel présente donc plus un potentiel informatif que comparatif. Il faut toutefois noter que l'information passe par la comparaison du produit avec d'autres produits comparables et faisant figure de référence.

En ce qui concerne les politiques énergétiques, celles-ci sont régies par le défi énergétique qui se présente à nous. Une des solutions à ce défi est la diversification des moyens de productions pour pouvoir proposer à la société une offre qui répond à ses besoins. L'offre énergétique actuelle est basée principalement sur les énergies fossiles. Ces ressources d'énergie étant non renouvelables et les réserves bientôt épuisées, la nature du bouquet énergétique doit changer et se tourner vers le renouvelable. Toutefois, le secteur des énergies renouvelable rencontre des difficultés qu'il doit surmonter telles que l'approvisionnement qui doit répondre continuellement à la demande. L'augmentation de l'offre en énergie par l'augmentation de sites de production se présente donc comme une solution à ces difficultés. La question sur l'hydroélectricité le long des cours ne porte donc pas sur l'installation ou non d'une centrale mais plutôt sur les enjeux liés à l'écoconception.

3.3.9. L'influence des aides gouvernementales

L'analyse ici présente est basée sur une durée de vie de la centrale de 30 ans. Cette durée fut choisie sur base de la durée d'un des éléments principaux de la centrale à savoir la vis d'Archimède. Un élément financier vient potentiellement affaiblir les résultats de l'analyse du cycle de vie. La rentabilité de la centrale est basée sur deux sources de revenus. D'un côté la vente de l'électricité produite et d'un autre côté, la vente des certificats verts obtenus en fonction de la production. Une

brève estimation des deux sources de revenus permet de se rendre compte de l'importance des certificats verts dans le bilan financier du projet.

Tableau 14 : revenus annuels de la centrale de Chaudfontaine (Cozannet, 2016a)

Production annuelle	330 000	kWh
Vente de l'électricité	0.107	€/kWh
Vente des certificats verts	65	€/MWh
Masse financière de l'électricité	$330\ 000 \times 0.107 = 35310$	€
Masse financière des certificats verts	$330 \times 65 = 21450$	€

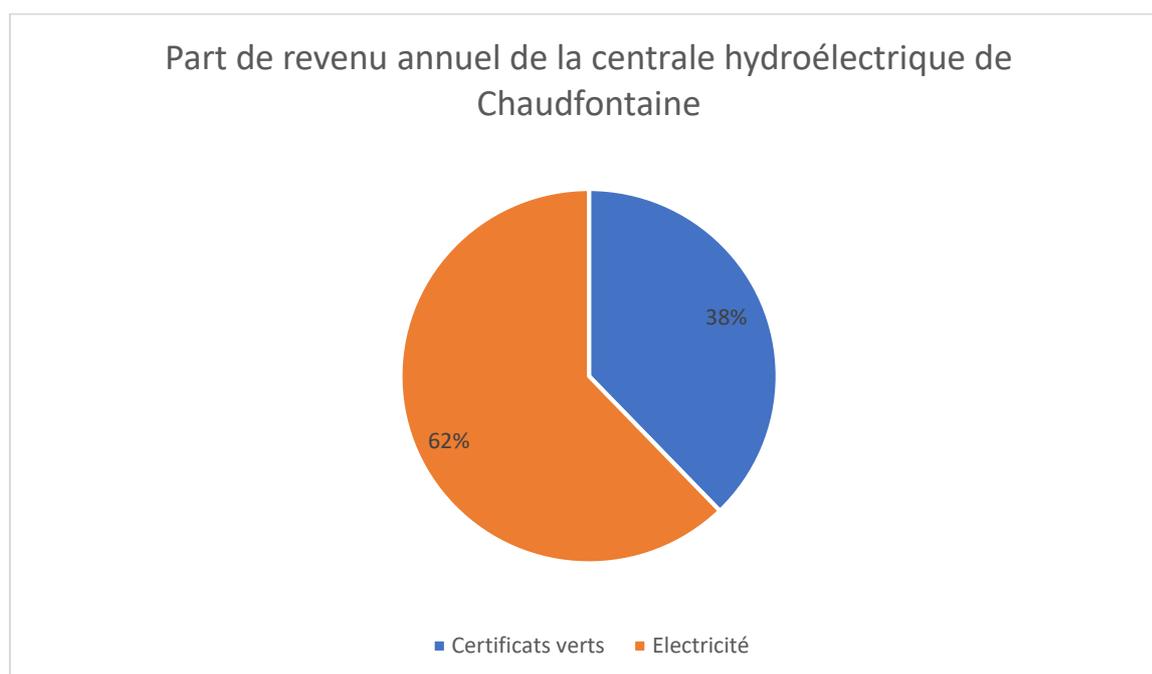


Figure 15 : part de revenu annuel de la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine

Les revenus liés aux certificats verts occupent donc une place non négligeable dans le bilan financier. Or, l'octroi de ces certificats n'est garanti que pour une durée de quinze ans. Arrivé au terme de cette durée, la possibilité est offerte au propriétaire de la centrale de renouveler la garantie des certificats verts en réalisant des travaux sur la centrale qui auront comme conséquences d'augmenter la productivité de la centrale. Dans cette analyse, ces travaux n'ont pas été pris en compte en raison de la variabilité de l'aide à l'investissement que représentent ces certificats. En effet, il n'est pas acquis que cette législation du renouvellement existera toujours en 2032. L'impact environnemental se trouvera donc fortement influencé par la réalisation de ces travaux, d'une part par le coût environnemental de ces travaux et d'autre part par l'augmentation de la productivité de la centrale.

3.3.10. Le génie civil multigénérationnel

Le traitement de l'impact du génie civil a fait l'objet de nombreux questionnement. En effet, le génie civil possède une durée de vie de 100 ans. La durée de vie de la centrale étant estimé à 30 ans, fallait-il prendre en considération trois dixième de l'impact du génie civil pour la centrale ou alors considérer l'ensemble de l'impact du génie civil. Un élément venant du cahier des charges imposé par la région Wallonne a permis de prendre la décision sur l'analyse du cycle de vie du génie civil. Le cahier

des charges permet de ne pas traiter les éléments de génies civils en fin de vie de la centrale. Il a donc été considéré que l'étape de fin de vie de la centrale pour les éléments en béton n'avaient pas d'impact sur l'environnement. Il s'agit donc là d'une minimisation des impacts du cycle de vie. Pour contrer cette influence, l'ensemble du génie civil a été imputé à la centrale. Cela veut aussi dire que les prochaines centrales auront un impact moins important étant donné qu'elles bénéficieront du génie civil déjà réalisé. Toutefois, l'enchaînement des centrales sur les mêmes bases de génie civil est un fait hypothétique que l'on ne peut à l'heure actuelle prédire avec certitude. En effet, il n'est pas certain que les conditions qui rendent le projet possible et rentable à l'heure actuelle soient toujours présentes dans trente ans. On peut donc imaginer plusieurs scénarii.

- ✓ Scénario 1 : les accords de Paris de 2015 ont porté leurs fruits et le climat s'est stabilisé. Les conditions de pluviométrie sont restées constantes sur la durée du cycle de vie de la centrale. La productivité et donc la rentabilité du projet a convaincu les investisseurs. Le cahier des charges pour assurer la continuité écologique du milieu s'est révélé efficace, il ne subit donc pas de modification. L'octroi du droit d'eau est prolongé et l'exploitation du site peut continuer en remplaçant les éléments arrivés en fin de vie par des équipements semblables. Les équipements à remplacer peuvent donc profiter des structures de génie civil déjà existantes et l'impact environnemental est donc diminué pour la centrale suivante.
- ✓ Scénario 2 : le changement climatique ne s'est pas atténué et les conditions pluviométriques se sont retrouvées totalement bouleversées en l'espace de trente ans. La pluviométrie serait alors caractérisée par des hivers très humides avec des crues très fréquentes et des étés très chauds et secs. Les conditions hivernales feraient peser un risque d'inondations important et la centrale représenterait un facteur d'accroissement de ce risque. En conséquence, les droits d'eau ne seraient alors plus accordés pour l'exploitation du site. En conditions estivales, les conditions de sécheresse entraînent une forte diminution de la productivité et la centrale ne serait alors plus rentable. Dans ces conditions, un renouvellement de la centrale ne serait pas concevable et les risques engendrés par les infrastructures feraient que le génie civil devrait être démantelé. Ce scénario très pessimiste engendrerait le fait que l'impact environnemental de la centrale ait été sous-estimé.
- ✓ Scénario 3 : les conditions pluviométriques ont été modifiées selon une augmentation du nombre de jours de pluie qui entraînent une augmentation du débit de la Vesdre et une régularisation des précipitations tout au long de l'année qui homogénéise le débit du cours d'eau. Les sols sont de plus en plus imperméabilisés sur le bassin versant de la Vesdre (augmentation des couvertures homogènes, tassement des sols, drainage des terrains) et le débit se voit donc augmenté. Les politiques énergétiques favorisent coûte que coûte la production d'électricité « verte » par une aisance accrue de l'obtention des droits d'eau et une augmentation du soutien financier à l'investissement. Dans ces conditions, la deuxième centrale posséderait une capacité de production plus élevée et pourrait donc profiter en partie des infrastructures de génie civil. En effet, ceux-ci devraient être adaptés à la nouvelle puissance de la centrale (vis avec un plus grand filets, canal d'aménagé plus large, etc). Le profil environnemental de la centrale serait légèrement sous-estimé étant donné que les modifications du génie civil ne seraient pas pris en compte.

Il faut noter que ces trois scénarii sont le fruit de considérations totalement hypothétiques et qu'ils présentent les raisons pour lesquelles les trois possibilités de devenir du génie civil sont considérées.

3.3.11. Intégration du modèle d'ACV au développement du panel d'offres de MTBE

S.a.

Suite à ce travail, le bureau d'étude sera initié à l'analyse du cycle de vie. Si l'analyse ici présente possède une portée globale sur l'activité du bureau d'étude, une intégration plus ciblée de l'analyse du cycle de vie dans le processus de recherche et développement se révèle pertinente. Deux sujets à traiter pour le processus de R et D dans le futur vont faire partie de la liste des sujets à développer.

Premièrement, une étude sur les passes à poissons réalisée au moyen d'une vis d'Archimède qui remonte de l'eau et donc les poissons de l'aval à l'amont de la centrale est prévue. Pour réaliser cette étude, une recherche de subside va être réalisée. Le dossier de demande de subsides pourrait donc intégrer une ACV de chaque système de passes à poissons et une partie comparative entre chaque système (système à vis d'Archimède et système en béton). Il est à noter que l'ACV introduite dans le dossier de demande serait une version provisoire et que la réalisation de l'étude de développement de la technique permettrait d'affiner cette analyse du cycle de vie.

Deuxièmement, la comparaison de deux centrales sur l'invasion de la vis par les algues permet d'intégrer l'utilité de l'application d'une analyse du cycle de vie sur le poste de la propreté de la vis. Concrètement :

- ✓ Une centrale dont la vis n'est pas recouverte et donc exposée à la lumière est victime de l'invasion de la vis par les algues. L'exposition de la vis à la lumière permet donc aux algues de s'y développer. Cette invasion est responsable de la diminution de la productivité de la centrale à hauteur de 18% de la puissance nominale de la centrale (Cozannet, 2013) (Duschene, 2017). Il est donc primordial de limiter l'invasion de la vis par les algues. La technique actuelle est le nettoyage de la vis au moyen d'un nettoyeur haute pression.
- ✓ Une autre centrale dont les vis sont recouvertes et donc non exposées à la lumière ne rencontre pas ce problème d'invasion par les algues. Les algues ne savent pas se développer étant donné qu'elles ne n'ont pas de lumière pour effectuer la photosynthèse (Duschene, 2017). Les plaques de recouvrement représentent donc le système d'entretien de la propreté de la vis.

L'intégration de l'ACV pour l'écoconception permettrait donc de comparer ces deux méthodes d'un point de vue environnemental et donc de créer un outil d'aide à la décision dans le choix entre les deux méthodes pour conserver la productivité.

Les postes à considérer seraient pour la méthode de nettoyage :

- ✓ L'énergie consommée par le nettoyeur haute pression ;
- ✓ L'eau consommée par le nettoyeur haute pression ;
- ✓ L'usure de la vis due à l'application de la haute pression ;
- ✓ Le transport routier de l'agent d'entretien et du matériel de nettoyage ;
- ✓ Le manque de productivité engendré par l'arrêt de la vis ;
- ✓ La fréquence de nettoyage nécessaire².

² Le développement algal sur la vis est également lié à la charge organique de l'eau. Une étude reliant la DBO⁵ et l'invasion de la vis serait donc nécessaire pour obtenir une analyse du cycle de vie pertinente. Bon nombre de vis d'Archimède ne sont pas envahies par les algues.

Les postes à considérer seraient pour la méthode du recouvrement de la vis :

- ✓ L'extraction des matières premières pour la production de la plaque et leur transport jusqu'à l'usine de production ;
- ✓ Les flux énergétiques et de matières pour la fabrication de la vis ;
- ✓ Le transport des plaques de recouvrement jusqu'à la centrale ;
- ✓ Le recyclage des plaques.

3.3.12. L'incertitude liée aux processus environnementaux

Une analyse du cycle de vie se base sur des caractéristiques et des processus environnementaux qui sont reconnus par la majorité du monde scientifique. Ces processus et ces caractéristiques permettent de quantifier l'importance de chaque sous-produit et processus sur l'environnement selon des problématiques environnementales définies. Or, la recherche scientifique est un processus continu qui livre tous les jours de nouveaux résultats et conclusions. La description des processus environnementaux est donc amenée à évoluer ainsi que les découvertes sur les conséquences des problématiques environnementales. Les conclusions d'aujourd'hui concernant les impacts et les dommages engendrés par un produit ne seront donc peut-être pas les mêmes que celles qui seraient réalisées demain en fonction des découvertes et avancées scientifiques. On peut citer en exemple les avancées dans le monde de la médecine qui jour après jour permettent d'expliquer de plus en plus de maladies liées à l'environnement. De plus, si on intègre les remèdes aux maladies actuelles, les catégorisations de dommage se voient continuellement modifiées quant à la quantification des dommages. En effet, si l'émission d'une quantité X de particules fines au temps T_0 avait un dommage pour la santé humaine d'une quantité Y d'unité DALY, les avancées de la médecine pourraient estimer que l'émission de la même quantité X de particules fines au temps T_1 aurait non plus un dommage pour la santé humaine d'une quantité Y d'unité DALY mais une quantité Y-Z d'unité DALY. X, Y et Z sont positifs. Un deuxième exemple qui ne fait pas directement intervenir le monde du vivant peut être la prospection géologique pour les ressources abiotiques. En effet, la catégorie d'impacts représentant l'épuisement des ressources abiotiques est considérée en fonction de la consommation de chaque ressource selon l'estimation des réserves présentes sur terre. La découverte d'un gisement d'un minerais X vient donc faire varier l'influence de sa consommation sur la catégorie d'impacts de l'épuisement des ressources naturelles. Par exemple, la découverte en 2016 de gisement de cuivre, zinc, plomb, or, argent, antimoine, bismuth, gallium et indium dans l'océan indien au sud de l'île Maurice (France diplomatie, 2016) pourrait avoir une influence sur l'évaluation de l'épuisement des ressources abiotiques. Cette affirmation vient du site de la diplomatie française qui s'est basé sur un rapport de l'ambassade d'Allemagne³. Un autre article faisait référence à la découverte de gisements de minerais en Afghanistan pour une valeur marchande dépassant celle du P.I.B. afghan (Le nouvel Obs, 2010). Toutefois, cet article fait référence à une zone géographique en crise qui représente un enjeu politique important au niveau international. Les influences sont donc trop importantes que pour s'y fier. La réalisation d'une méthode d'analyse d'un inventaire du cycle de vie doit donc aussi se méfier des données qui sont publiées et du contexte qui entoure ces données mais cette méfiance est inhérente à l'ensemble des publications scientifiques.

Si le paragraphe ci-dessus peut paraître fort critique par rapport aux méthodes d'analyse du cycle de vie, il est toutefois important de relever le fait que d'établir de telles bases de données est un

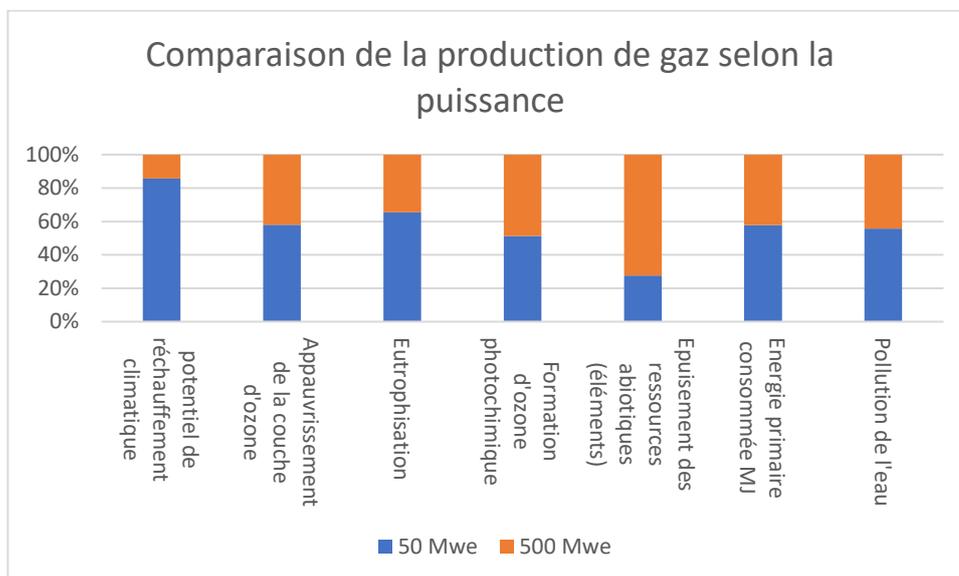
³ "Indischer Ozean : Erfolgreiche Expedition im deutschen Lizenzgebiet BGR entdeckt neue großflächige Erzvorkommen", Communiqué de presse du BGR, 17/12/2015 – http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/bgr-151217_INDEX_indischer_ozean.html?nn=1544712

travail colossal. Analyser chaque processus environnemental de chaque flux élémentaire par rapport à une catégorie d'impacts représente une masse de travail qui ne saurait être mise à jour à une fréquence élevée. De plus, les méthodes d'analyse utilisées dans le cadre de ce travail furent acquises gratuitement. La mise à jour en est donc retardée étant donné les importants moyens nécessaires à la réalisation de ces bases de données. Si elles ne sont pas parfaites, les méthodes d'évaluation de l'inventaire du cycle de vie sont le meilleur moyen que l'on possède aujourd'hui pour évaluer l'impact du cycle de vie d'un produit. De plus, si les incertitudes liées aux méthodes d'évaluation sont appliquées à l'ensemble des produits analysés, leur comparaison qui est un des objectifs de l'analyse du cycle de vie garde une pertinence tout à fait satisfaisante.

3.3.13. L'économie d'échelle de la production énergétique

Une des principales explications de l'impact plus important de la centrale par rapport aux dispositifs de production de plus grosse puissance est l'économie d'échelle qui s'appliquerait aux processus de production. Dans la centrale, les secteurs les plus impactant sont selon la sensibilité de chacun soit le génie civil soit l'électromécanique. Ces deux secteurs sont sujets à l'économie d'échelle.

Pour le génie civil, on peut citer les transports des engins de chantier de l'entreprise à l'emplacement de la future centrale. De manière plus large, si on considère les barrages hydroélectriques, l'ampleur des aménagements de génie civil sera principalement liée à la hauteur d'eau à retenir et donc à la réponse aux contraintes mécaniques imposées par l'eau. Pour le même génie civil, on peut donc avoir des réservoirs de longueurs et de largeurs différentes. A profondeur constante, la surface du réservoir impacte le volume d'eau retenu. La quantité d'eau turbinable pour un même génie civil augmente avec la taille du réservoir ainsi que la production qui est proportionnelle au volume d'eau turbiné. L'économie d'échelle s'applique dans ce cas-ci.



Graphique 11 : Comparaison de la production de d'électricité à partir du gaz selon la puissance des centrales.

Lorsque l'on compare la production de gaz par une centrale 50 MW et une de 500 MW, on s'aperçoit que globalement et arbitrairement, la centrale de 500 MW a un impact moins important. Il faut aussi noter que dans le cas des énergies fossiles la différence selon la puissance pour l'impact sur la consommation d'énergie primaire, est plus faible que pour les énergies renouvelables étant donné que l'énergie de base (le gaz en l'occurrence) est prise en compte.

3.3.14. Le kilomètre parcouru en voiture

Pour se donner une idée de l’empreinte de la centrale hydroélectrique sur le potentiel de réchauffement climatique, comparons un kilomètre parcouru par un véhicule équipé d’un moteur thermique et par véhicule électrique fonctionnant avec l’électricité produite à Chaudfontaine par la centrale du barrage Bacquelaine.

Véhicule thermique

Prenons un véhicule thermique considéré comme performant environnementalement.

Consommation : 5l/100km de diesel, rejet de CO₂ 100 grammes/km, rendement mécanique de 23 % (La société française de physique, 2000).

On peut dire que par kilomètre, il a rejeté 100 gramme de CO₂ et qu’il consommé 0.05 litres de diesel. Ces 0.05 l représentent une valeur énergétique de 0.5 kWh (PCI du diesel = 10 kWh/l). De ces 0.5 kWh consommés, 0.115 kWh ont été transformés en énergie mécanique pour faire avancer la voiture (0.5*0.23).

Véhicule électrique

Si on considère la même voiture (avec des pertes de frottement identiques) on peut affirmer que pour lui faire parcourir 1 km, il faut fournir aux roues 0.115 kWh. Si on applique un rendement de 0.675 (alternateur : 0.75 et recharge : 0.9) (La société française de physique, 2000), l’énergie électrique consommée par la voiture sera de 0.17 kWh. Si considère que la voiture est venue recharger ses batteries à la centrale de Chaudfontaine, son rejet de CO₂ sera de 0,17 kWh/km*31 g éq CO₂/kWh = 5,27 g éq CO₂/km.

Si maintenant, la voiture est rechargée dans une habitation bénéficiant du mix électrique européen, le rejet de CO₂ sera de 0.17 kWh/km*480 g éq CO₂/kWh = 81,94 g éq CO₂/km

Ici l’approche n’est pas orientée cycle de vie, il s’agit plutôt d’une illustration basée sur un exemple concret. Une approche cycle de vie aurait dû intégrer le cycle de vie des voitures et l’extraction de l’énergie.

Si cette interprétation fait un petit peu office de propagande, il s’agit là d’une piste d’exploitation de l’ACV pour MTBE s.a. en effet, la présentation de ce résultat peut faire office d’argument de vente.

3.3.15. Temps de retour énergétique

Si la rentabilité absolue d’un point de vue environnemental est très compliquée à établir, la rentabilité énergétique est beaucoup plus facile à établir, à l’instar de la rentabilité économique.

L’analyse du cycle réalisée nous montre que la consommation d’énergie primaire est de 0.339 MJ/ kWh produit soit 0.0941 kWh/kWh. Il s’agit donc du ratio entre énergie consommée et énergie produite. Si on ramène ce ratio à la durée de vie de la centrale, on peut dire qu’après 2.82 ans, l’intégralité de l’énergie qui a été, qui est et qui sera consommée, a été produite. L’énergie produite après ces 2.82 ans soit pendant 27.18 ans sera considérée comme purement bénéfique.

En ramenant cette donnée à l’échelle de temps d’une année de 365 jours et en considérant une habitation qui est directement reliée à la centrale et qui appartient à HydroB, une consommation de la maison correspondant en tout temps à la production de la centrale. On peut considérer que la consommation d’énergie issues de l’extérieur de la centrale s’arrête le 4 février aux environs de 8 heures.

Cette hypothèse est basée sur une production constante au cours du temps. Dans la réalité, la date citée ci-dessus serait plus avancée du fait du débit plus important en hiver.

3.4. Discussion

S'il a été vu que l'analyse du cycle de vie ne représente pas un moyen infaillible pour l'évaluation environnementale de la centrale hydroélectrique de Chaudfontaine, il est clair qu'elle permet de se donner une bonne idée d'ensemble de son impact concernant certaines problématiques environnementales. Au travers de ce point de vue, il est possible de relativiser ces impacts par rapport à d'autres moyens de production énergétique. L'utilisation de l'unité fonctionnelle permet en effet de comparer deux produits sur une base jugée suffisamment pertinente. Toutefois, la réalisation d'une ACV pour un système avec une si longue durée de vie est un travail délicat par rapport à l'évolution de la société. En effet, les processus élémentaire et sous-produits sont amenés à évoluer au cours du temps. Le travail ici présent aura donc besoin d'être mis à jour pour garder de sa qualité. Les mises à jour lui permettront donc dans le futur de gommer son obsolescence.

La relativisation a permis de placer le procédé au niveau du contexte énergétique européen. Si au cours de la comparaison, il a été relevé que le système étudié n'est pas le plus performant du point de vue des impacts environnementaux considérés, il faut replacer la centrale dans son contexte. Tout d'abord, la productivité d'une centrale hydroélectrique est tributaire des caractéristiques hydrologiques et topographiques de son site d'exploitation. En effet, la centrale de Chaudfontaine exploite un site qui n'a pas été à la base, prévu à cet effet. L'exploitation considérée est donc l'expression d'un certain opportunisme par rapport aux installations hydrauliques préétablies. Il s'agit en réalité de prendre en considération les données de terrain afin d'optimiser la production électrique. De plus, la réputation de la Belgique en tant que pays plat, contraint les investisseurs à exploiter des sites dont le potentiel de productivité n'est pas comparable aux sites dont les caractéristiques sont optimales, tels que le milieu montagnard. Toutefois, la qualité d'un site n'est pas uniquement évaluée en fonction de son potentiel de productivité mais aussi en fonction de l'application qui est envisagée pour l'énergie transformée. Les nombreuses roues à aube installées par les meuniers attestent de ce fait. A l'heure actuelle, si le vecteur électrique permet de transformer et de transporter l'énergie aisément, la question de quantité de l'offre est plus à l'ordre du jour.

En effet, le contexte énergétique actuel nous oblige à modifier nos moyens de productions énergétique afin de conserver nos acquis en terme de niveau de vie. Ce contexte a aussi modifié notre considération de la rentabilité des projets hydroélectriques. Si l'hydroélectricité est l'énergie renouvelable la plus installée dans le monde en terme de puissance, c'est dû à sa rentabilité lorsqu'elle est liée à des sites d'exploitation particulièrement avantageux. En effet, la production à partir de sites permettant d'atteindre des puissances de l'ordre de la centaine de MW représente un avantage économique considérable. La variabilité de l'offre énergétique a fait qu'aujourd'hui, le point de vue énergétique est plus présent dans la question de la rentabilité. Si bien que les aides gouvernementales permettant de rentabiliser économiquement des projets qui ne l'étaient pas à la base en atteste. La politique énergétique menée en Belgique au travers des certificats verts permet donc de rendre attrayantes la production d'électricité en dépit de sa faible rentabilité économique. Ces aides traduisent donc la prise de conscience des besoins énergétiques d'aujourd'hui mais surtout de ceux de demain.

S'il a été avéré au travers de cette analyse que le cas étudié n'est pas le meilleur en terme d'impacts environnementaux, il n'en demeure pas moins que selon certains critères, il reste performant d'un point de vue environnemental. Il faut aussi rappeler que les questions environnementales ne sauraient être réglées selon une solution unique. Ces questions

environnementales sont liées aux activités anthropiques. De plus, l'inertie du mode de vie d'une certaine partie de l'humanité se dresse comme mur en travers de l'atteinte d'un développement qui nous permettrait de répondre à nos besoins sans compromettre les chances des générations futures de pouvoir répondre aux leurs. Cet objectif sera donc atteint lorsque pierre par pierre, le mûrs sera détruit. Dans cette optique et aux moyens des projets qu'ils réalisent, les membres du bureau d'études MTBE s.a. et leurs associés agissent pour une production d'énergie moins impactante pour les générations futures. En tant que maître d'œuvre, les possibilités d'action de MTBE s.a. résident dans le choix des sous-produits et processus élémentaires pour réaliser chacune leur centrale. En tant que secteur le plus impactant sur le cycle de vie, les choix portés sur l'électromécanique et le génie civil peuvent traduisent bien l'engagement environnemental du bureau d'étude. En effet, en choisissant un fournisseur tel que Schneider electric qui est certifié ISO 14001 et un sous-traitant local pour le génie civil, MTBE utilise son pouvoir de décision pour impacter favorablement le cycle de la centrale de Chaudfontaine. Ces considérations ne sont pas uniquement pour la centrale de Chaudfontaine. La centrale de Courteron située en Champagne française, est également équipée de matériel Schneider et le génie civil se situe dans un rayon de moins de 5 km. De plus, socialement parlant, la construction de projets à taille plus humaine permet de rendre plus accessible l'investissement dans l'hydroélectricité. De cette manière, la diversification des investisseurs est un bon moyen d'éviter les situations de monopole qui mettent en danger la souveraineté de certains états. De plus, les forces liées à ce genre de projets sont plus équilibrées en cas de désaccord. Lors de la construction de gros projets hydroélectriques, les considérations des populations locales ne sont pas toujours prises en compte. La petite hydroélectricité installée au fil de l'eau peut également être un moyen de développement pour les pays sous-développés ou en voie de développement grâce à la délocalisation rendue possible pour ce genre d'installation. Une étude a été réalisée durant l'année 2017 pour l'installation d'une centrale hydroélectrique sur le fleuve Congo. Cette centrale permettrait l'approvisionnement d'un village isolé en électricité. Il s'agirait donc d'un projet permettant le désenclavement de la région.

4. Conclusion

Louis Blanc disait en 1851 « *A chacun selon ses capacités, à chacun selon ses besoins* ». Si cet adage fut mis sur papier pour décrire la société communiste, je le trouve également bien adapté au cas étudié. En effet, en tant que bureau d'étude, MTBE s.a. ne prend pas de pouvoir de décision sur le choix des sites à équiper d'une centrale hydroélectrique. Le travail du bureau d'étude réside dans l'optimisation de la production au sein des sites qu'il leur est demandé d'équiper. Chaque site étudié est donc étudié en considération de ses caractéristiques topographiques et hydrologiques pour produire de façon durable de l'électricité considérée comme verte. Si les impacts environnementaux calculés au cours de cette étude ne s'avèrent pas être les plus favorables en comparaison avec d'autres moyens de production, ces impacts sont une contrepartie à la solution proposée pour relever le défi énergétique. De plus, le fait de diversifier les sites de production au niveau géographique et technologique permet d'assurer une certaine sécurité en termes d'approvisionnement énergétique. En effet, les énergies renouvelables étant très assujetties aux conditions météorologiques, une perturbation de ces conditions peut induire un arrêt de la production électrique. Diversifier les sites de productions peut permettre d'être moins dépendant de ces perturbations.

La diversification peut aussi représenter un avantage énergétique en termes de transport de l'énergie. En effet, en réduisant les distances de transport, on réduit les pertes électriques liées à l'effet joules. La quantification de cet impact n'est toutefois pas reprise dans cette analyse. Les limites du système s'arrêtant au raccordement de la centrale au réseau, l'impact du cycle de vie de la distribution n'est ici pas décrit. Ces limites sont directement liées aux objectifs de l'étude qui était d'identifier certains impacts environnementaux de la centrale de Chaudfontaine installée sur le barrage Bacquelaine pour permettre de placer la centrale hydroélectrique dans le contexte énergétique européen. Parmi les centrales installées par MTBE, le site de Chaudfontaine fut choisi non seulement pour sa représentativité mais aussi pour des raisons pratiques telles que la proximité avec le bureau d'étude et la bonne entente avec le propriétaire de la centrale.

Si la méthode utilisée souffre de quelques faiblesses liées à l'incertitude des résultats, elle est toutefois reconnue comme suffisamment efficace que pour être appliquée internationalement. De plus, si les erreurs liées à la méthode sont uniformément appliquées aux analyses, la destinée d'outil de comparaison de l'ACV en est moins impactée.

Les considérations liées aux analyses du cycle de vie sont de plus en plus importantes dans les prises de décisions. Si bien que bon nombre de sociétés dans le secteur du bâtiment publient de plus en plus de fiches permettant de se renseigner sur l'impact environnemental de leur produit. On pourrait toutefois penser que ces fiches sont réalisées par les constructeurs comme argument de vente et que les résultats en seraient donc tronqués. La revue prévue par la norme ISO 14040 vient nous rassurer sur le bien-fondé des résultats contenus dans ces fiches. Ils ont donc été largement utilisés dans le cadre de cette analyse pour décrire l'impact engendré par la centrale. Si l'agrégation des résultats n'as pas permis d'inventorier chaque flux, l'impact de chaque sous-produit était décrit de manière à assurer une continuité suffisante dans les résultats d'inventaire. De plus, l'édition du profil environnemental par l'organisme fabricant permet d'accroître la précision des résultats étant donné l'absence de l'obstacle lié à la confidentialité d'entreprise et à l'allocation de ressources pour communiquer les flux.

Le libre accès à un logiciel permettant d'élaborer des analyses du cycle de vie fut également une condition nécessaire pour réaliser ce travail. En effet, au vu des ressources allouées à ce travail l'absence de ce logiciel aurait entaché considérablement les résultats obtenus. Toutefois, une revue de ce travail avec des outils à la pointe du domaine pourrait apporter des améliorations à ce travail. La

revue appliquée aux méthodes et aux bases de données permettrait de gommer l'obsolescence dont souffre les outils utilisés dans ce travail.

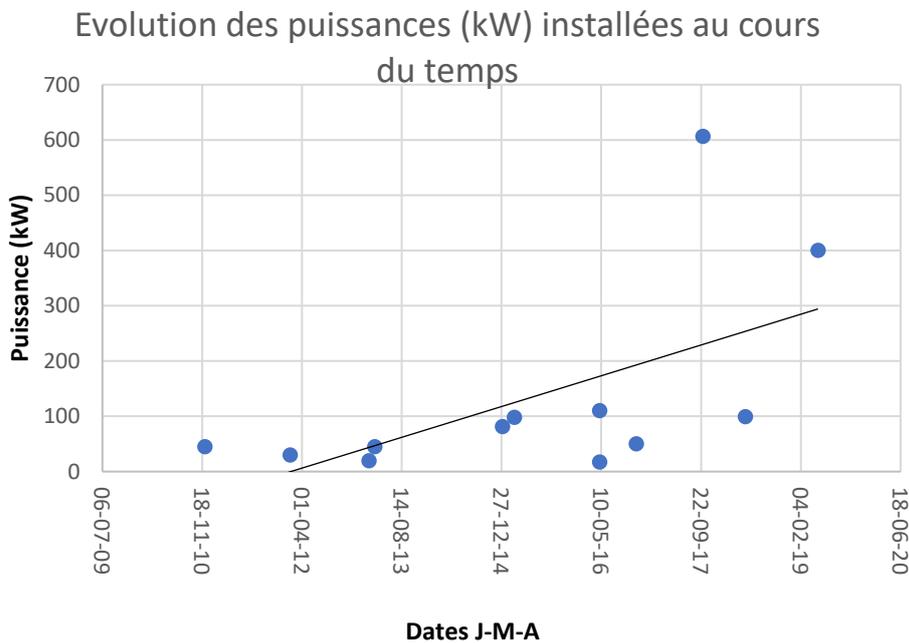
Les résultats ont donc permis de placer la centrale étudiée dans le contexte énergétique de la région géographique. La comparaison avec les autres systèmes de production électrique n'a pas permis d'élaborer un grand nombre de conclusions générales mais plutôt de comparaisons impact par impact entre deux systèmes. L'analyse profonde de chaque impact n'a toutefois pas été réalisée en raison des ressources allouées. Toutefois, la mise en évidence de la différence d'impact entre deux systèmes permettra au futur utilisateur de cibler les processus environnementaux avec pertinence pour une amélioration de l'impact du cycle de vie.

Si elles n'ont pas été nombreuses, les conclusions générales relèvent tout de même que l'économie d'échelle s'applique à la production d'énergie pour les impacts environnementaux, que la consommation de ressources abiotiques est liée à la rareté des substances utilisées et l'impact sur le réchauffement climatique et la consommation d'énergie primaire sont plus faibles pour les énergies renouvelables.

L'utilisation de cette étude en tant qu'outil d'aide à la prise de décision reste toute de même limitée. Son utilisation pour encadrer une décision globale portant sur les politiques énergétiques souffrirait d'un manque de solidité en raison des outils qui ont été utilisés pour la réaliser. De plus, il a été vu que dans les conditions actuelles, un choix entre tel ou tel énergie renouvelable pour un développement global n'est pas pertinent. Cette analyse, pour être utilisée en tant qu'élément de comparaison, devraient être entourée d'autres analyses portant sur le même genre de centrale et permettant de comparer les différentes technologies de turbinage par exemple. De cette manière, outre les aspects techniques, les aspects environnementaux pourraient intégrer les éléments sur lesquels le choix de technologie serait porté. C'est donc, entre-autre, en développant son panel d'analyse de cycle de vie que MTBE s.a. pourrait accroître son engagement pour le développement durable. La prise en compte des résultats ne concernera toutefois pas directement la protection de l'environnement local étant donné la délocalisation des émissions et du site d'installation. Par exemple, si l'eutrophisation de l'eau est un impact majeur pour une société dont l'activité est essentiellement basée sur les milieux aquatiques, les choix favorisant une faible eutrophisation n'amélioreront pas forcément la qualité de l'eau du site exploité. Il faut en effet prendre en compte la délocalisation des flux. Certains flux étant délocalisés, les améliorations environnementales seront mesurées à une échelle globale. Cette analyse n'a toutefois pas pris en compte l'ensemble des flux localisés du fait du jeune âge de la centrale et de la durée limitée de l'analyse du cycle de vie. Le transfert d'oxygène de l'air vers l'eau du aux remous créés par la vis d'Archimède n'a par exemple pas été analysé. Il s'agit donc d'une amélioration qui peut encore être apportée à cette analyse. Ce genre de remarque est inhérente à toutes les analyses du cycle de vie étant donné le fait qu'une analyse ne peut être exhaustive au niveau de son inventaire.

Avec ce travail, le bureau d'étude MTBE s.a. a donc été initié à l'analyse du cycle de vie et a découvert un moyen supplémentaire de participer au développement durable de la société. Toutefois, il ne faut pas considérer ce travail comme une fin en soi. En tant qu'outils d'aide à la décision, il est destiné à être utilisé dans le futur pour prendre des décisions sur le développement futur. Il devra donc être adapté en fonction de l'application qui lui est destinée. La valeur de ce travail sera aussi augmentée avec l'élaboration d'analyse portant sur des projets similaires en tailles. Même si la décision sur le site à équiper n'appartient pas au bureau d'étude, l'avancement de la piste de l'économie d'échelle appliquée aux impacts environnementaux peut influencer la direction de développement de la société vers des projets de plus en plus importants. Toutefois, si on regarde

l'évolution des puissances installées au cours du temps par MTBE s.a. on peut s'apercevoir que cette direction est déjà prise depuis un certain temps.



Graphique 12 : Evolution au cours du temps des puissances installées par MTBE s.a. (Cozannet, 2017)

Enfin, en tant que travail de fin d'étude, l'intérêt réside dans la diversité des tâches qui ont dû être réalisées. En effet, dans cette diversité, on retrouve la représentation du curtilus proposé par le master d'énergie renouvelable et développement durable et aussi le développement des compétences nécessaires dans le monde de l'entreprise. En effet, les cours d'énergies renouvelable, de système énergétique, de climatisation, de matériaux de construction, d'efficacité énergétique des bâtiments, de méthodologie et de pollutions atmosphérique furent pour ce travail d'une grande aide.

Bibliographie

- ABB. (2002). Environmental Product Declaration - AC Low voltage cast iron motor , type M3BP 315, 1–6. Retrieved from [http://www09.abb.com/global/scot/scot292.nsf/veritydisplay/6d5d9840ca2fa0f3c1256d63003e98bf/\\$file/EPD_M3JP180GB.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot292.nsf/veritydisplay/6d5d9840ca2fa0f3c1256d63003e98bf/$file/EPD_M3JP180GB.pdf)
- ADEME. (2016). L'évaluation environnementale en agriculture - L'outil AGRIBALYSE® – ADEME. Retrieved July 13, 2017, from <http://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-agricole/passer-a-l'action/dossier/levaluation-environnementale-agriculture/loutil-agribalyser>
- afnor. ISO 14040 (2006). Paris.
- Afnor. ISO 14044 (2006). Paris, France.
- AFNOR. (2015). Certificat de certification ISO 14001. France: F. Lebeugle. Retrieved from http://download.schneider-electric.com/files?p_Reference=Certificat+ISO+14001+2015++Carros+Plant&p_EnDocType=Certificate&p_File_Id=3498358612&p_File_Name=20160525_CE RTIFICAT+2015+ISO+14001+-V2015.pdf
- ALCEN. (2015). Les chiffres clés de la production d'énergie primaire dans le monde. Retrieved August 11, 2017, from <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/chiffres-cles-production-d-energie>
- Andre, P. (2016). *Technologie énergétique non conventionnelles et valorisation des énergies renouvelables partim : énergie éolienne cours n°2*. Arlon: ULg.
- Antikforever. (n.d.). Quelques grands Rois d'Assyrie : Sennachérib 705 à 681. Retrieved from <http://antikforever.com/Mesopotamie/Assyrie/sennacherib.htm>
- Benini, L., Mancini, L., Sala, S., Schau, E., Manfredi, S., & Pant, R. (2014). *Normalisation method and data for Environmental Footprints*. Berlin: Greendelta. <http://doi.org/10.2788/16415>
- Bernard, S. (n.d.). Dosages du béton _ calcul des quantités - GuideBeton. Retrieved June 13, 2017, from <http://www.guidebeton.com/dosages-beton>
- Boeglin, N., & Veuillet, D. (2005). *Introduction à l'analyse du cycle de vie*.
- Burton, C. (2014). *Note technique pour la protection de l'ichtyofaune Les Vis hydrodynamiques « fishfriendly »* (Vol. 32). Esneux.
- Burton, C. (2017). Présentation de la station hydroélectrique de Chaudfontaine sur le barrage Bacquelaine. Chaudfontaine.
- BWT. (2017). Eau de refroidissement - BWT Best Water Technology. Retrieved August 11, 2017, from <http://www.bwt.be/fr/Professionnels/Traitement-tertiaire-industriel/Domaine-d-application/eau-de-refroidissement/Pages/default.aspx>
- Callmepower. (2015). Consommation moyenne d'électricité en Belgique. Retrieved from <http://callmepower.be/fr/faq/consommation-moyenne-electricite>
- Casasola, F., Weisser, T., Dupuis, R., & Aubry, E. (2015). Étude de l'efficacité mécanique d'une vis hydrodynamique Abstract : (p. 8). Lyon. Retrieved from <http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/57137/68694.pdf?sequence=1>
- CERIB. (2017). *BLOC EN BETON Fiche de déclaration Environnementale et Sanitaire Environmental and Health Product Declaration*.

- CNRS. (2014). Le recyclage des métaux _ EcoInfo. Retrieved July 1, 2017, from <http://ecoinfo.cnrs.fr/?p=11387>
- Cozannet, B. (2013). références _ mtbeVal notre dame. Mery: MTBE. Retrieved from <http://mtbe.be/references>
- Cozannet, B. (2016a). *Centrale Hydroélectrique Bacquelaine à Chaudfontaine (Vesdre) Paramètres techniques du Projet : Acteurs opérationnels* : Tilff.
- Cozannet, B. (2016b). Centrale Hydroélectrique Schoenau, 2011. Retrieved from <http://mtbe.be/wp-content/uploads/2017/01/160609-MTBE-Fiche-projet-10-Shoenau.pdf>
- Cozannet, B. (2017). références _ mtbe. Retrieved August 15, 2017, from <http://mtbe.be/references>
- Domingo, L; Ezzahir, L. (2001). C Oastal E Nvironmental P Rofile S Arangani B Ay a Rea, (12), 1–11.
- Duschene, N. (2017). *entretien sur le réseau de centrale hydroélectrique d'HydroB*. Mery.
- Ecocem. (2014). Profil environnemental caisson de ventilation. Retrieved from <http://ecocem.fr/>
- Edilfibro. (2015). FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE DU ENVIRONMENTAL AND HEALTH PRODUCT DECLARATION Plaque métallique pour couverture en acier prélaqué, 1–22.
- EDORA asbl. (2013). Et l'hydro ça marche en belgique, 1–3. Retrieved from http://www.edora.org/wp-content/uploads/2017/02/12fiche_hydro_MEF.pdf
- Encyclo-ecolo. (2011). Béton, ciment et environnement - Encyclo-ecolo. Retrieved April 13, 2017, from https://www.encyclo-ecolo.com/Béton%2C_ciment_et_environment
- Energie+. (n.d.). Les valeurs de coefficients de transmission thermique (U) de parois types. Retrieved May 24, 2017, from <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15347>
- Esus, E. D. A. D. E. J., Añola, C. L. L. N., & Abangon, H. E. J. C. (2001). PEP Screw Terminal with Flap - 16 A - IP 44 - White LEGRAND'S, 33(0), 4–7.
- European Commission. (2013). European Life Cycle Database. Retrieved July 15, 2017, from <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>
- eurostat. (2016). File_Net electricity generation, EU-28, 2014 ⁽¹⁾ (% of total, based on GWh) YB16-fr. Retrieved July 15, 2017, from [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Net_electricity_generation,_EU-28,_2014_\(1\)_\(%25_of_total,_based_on_GWh\)_YB16-fr.png](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Net_electricity_generation,_EU-28,_2014_(1)_(%25_of_total,_based_on_GWh)_YB16-fr.png)
- Flender Siemens. (2010). *Gearbox BA 5010en.pdf*. Bocholt.
- Flury, K., & Frischknecht, R. (n.d.). Life Cycle Inventories of Hydroelectric Power Generation.
- France diplomatie. (2016). Découverte de nouveaux gisements de minerai sous-marin dans l'océan indien - France-Diplomatie - Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. Retrieved August 7, 2017, from <http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/politique-etrangere-de-la-france/diplomatie-scientifique/veille-scientifique-et-technologique/allemagne/article/decouverte-de-nouveaux-gisements-de-minerai-sous-marin-dans-l-ocean-indien>
- Gillet, C. (2006). 1 , 4-Dichlorobenzène. *Ineris*, 1–49.
- Greendelta. (n.d.). Open LCA. Berlin: Nexus.
- Greendelta. (2009). Steel hot rolled coil, production mix at plant.

- Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppés, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; H. (2001a). LCA - An operational guide to the ISO-standards 2a: Guide (Final report, May 2001. Retrieved from <http://media.leidenuniv.nl/legacy/new-dutch-lca-guide-part-2a.pdf>
- Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppés, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.A.; Bruijn, H. de; Duin, R. van; H. (2001b). LCA - An operational guide to the ISO-standards 2b: Guide (Final report, May 2001. *Microelectronics Reliability*, 26(4), 794–794. [http://doi.org/10.1016/0026-2714\(86\)90158-7](http://doi.org/10.1016/0026-2714(86)90158-7)
- Hischier, R., Weidema, B., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Dones, R., ... Nemecek, T. (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2 (2010). *Ecoinvent Report No. 3*, (3), 176. Retrieved from https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf
- Hydro-Québec. (2013). *Analyse de cycle de vie de filière de production décentralisée d'énergie électrique à petite échelle*. Montréal. Retrieved from <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/ACV-filieres-energie-electrique-sommaire.pdf>
- INIES. (n.d.-a). Equipements du bâtiment (PEP). Retrieved April 24, 2017, from <http://www.inies.fr/equipements-du-batiment/>
- INIES. (n.d.-b). Produits de construction (FDES). Retrieved April 24, 2017, from <http://www.inies.fr/produits-de-construction/>
- ISO. ISO 14044 (2009). France.
- ISO. (2012). *Les étiquettes et déclaration environnementales : La contribution des normes ISO*. Genève. Retrieved from <https://www.iso.org/files/live/sites/isoorg/files/archive/pdf/fr/environmental-labelling.pdf>
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., & Shaked, S. (2010). *Analyse du cycle de vie comprendre et réaliser un écobilan*. (Presses pl). Lausanne.
- Keuning, R. (2017). *Visite de la société Spaans Babcock*.
- König, C. (2015). Histoire _ du moulin à eau au moulin à vent. Retrieved August 11, 2017, from <http://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/geographie-tourisme-charente-1177/page/4/>
- La société française de physique. (2000). La discussion sur la voiture électrique (Un peu de Physique élémentaire. Retrieved from http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie/websfp/Livet-elect.htm
- Laatu, M. (2002). AC low voltage cast iron motor, type M3BP 315 PEP. Vaasa Finland: ABB.
- Le goff, A. (2012). DECLARATION ENVIRONNEMENTALE et SANITAIRE CONFORME A LA NORME NF P 01-010 Porte Bel'M de la gamme Acier (dormant bois), modèle non vitré EQUATION, 1–25.
- Le Monde.fr. (2010). Des quantités _considérables_ de méthane rejetées par un barrage en Suisse. *Le Monde*. Retrieved from http://www.lemonde.fr/planete/article/2010/10/11/des-quantites-considerables-de-methane-rejetees-par-un-barrage-en-suisse_1423778_3244.html
- Le nouvel Obs. (2010). Découverte d'importants gisements de minerais dans le sous-sol afghan - 14 juin 2010 - L'Obs. *L'obs*. Retrieved from <http://tempsreel.nouvelobs.com/monde/20100614.OBS5497/decouverte-d-importants-gisements-de-minerais-dans-le-sous-sol-afghan.html>

- Legrand. (n.d.). Product Environmental Profile Hypra Panel mounting sockets from 63A to 125A, 33(0), 4–7.
- Legrand. (2013). PEP interrupteur va et vient blanc, 5–8.
- Legrand. (2014). Primaline 50 W + Prise 2P+T (Halogène), 2–5. Retrieved from <http://www.base-inies.fr/inies/UploadedFiles/PEPUploads/LGRP-2014-065-V1-FR.pdf>
- Ministère de l'Environnement de l'énergie et de la mer Ministère du logement et de l'habitat. (2014). Documentation du Module de Données Environnementales Génériques par Défaut, 14044.
- Néomitis. (2015). NEOMITIS Radiateur électrique fluide monojoue CALIANTHYS ONE +, 1–4.
- ouest fixation. (1978). *Histoire de la vis*.
- Reimann, K., Paulsson, S., Wikström, Y., & Weaving, S. (2013). Environmental Product Declaration- variateur de fréquence. *Springer, 4*, 1–10. Retrieved from <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-94-007-1899-9.pdf#page=606>
- Rutten, D. (2017). *Présentation de la centrale de Chaudfontaine*. Chaudfontaine.
- Sarlam. (2000). Profil Environnemental Produit Hublot Chartres Infini avec détection HF intégrée, 2–5.
- Schneider Electric. (n.d.). Te Sys T Profil Environmental Produit - PEP Présentation du produit-Relais de découplage.
- Schneider Electric. (2010a). Product environmental profile. Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2010b). Product environmental profile-armoire électrique. Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2010c). Product environmental profile- Switch éthernet, (Lmc). Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2010d). Product environmental profile-Automat dégrilleur, (Lmc). Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2010e). Product environmental profile-frequency variator. Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2010f). Product environmental profile-Interface machine 7.5". Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2010g). Product environmental profile-Variateur de fréquence altivar 312. Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2010h). Product environmental profile thermostat. Retrieved from www.schneider-electric.de
- Schneider Electric. (2012). Product environmental profile- Harmony 9001KQ.
- Spaans Babcock. (2015). L'énergie renouvelable avec une vis d'Archimède. Retrieved April 7, 2017, from http://www.spaansbabcock.com/fr/hydro_dynamique.aspx
- Wastiels, L. (2015). Messages environnementaux sur les produits de construction. *CSTC Contact 2015/2*. Retrieved from <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact46&art=684>

Woolley, T. (2008). *GALVANISATION ET CONSTRUCTION DURABLE*. Belfast. Retrieved from <http://www.galvaunion.com/pdf/galvanisation-developpement-durable.pdf>

Zougrana, H. (2015). *Données GC Laurent*. Esneux.

Annexe 1 : Tableau reprenant la source de données pour chaque sous-système.

	Produit	Production	Mise en œuvre	Vie en œuvre	Fin de vie
GENIE CIVIL					
GC 1	Béton	NEEDS, données de composition : http://www.guid beton.com/composition-beton	NEEDS et données de transport et de pompage calculée avec google maps et données sous-traitants	/	/
GC 2	Acier	ELCD _3_2_ greendelta	données de transport et de pompage calculées avec google maps et données sous-traitants	/	/
GC 3	Bloc de 14 cm	FDES de la société CERIB	FDES de la société CERIB	/	/
GC 4	Porte métallique	FDES belm.fr	/	/	/
GC 5	Fenêtre 100x100	FDES UFME	/	/	/
GC 6	Couverture en crépis	Module de données environnementales générique par défaut MDEGD par Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages			
GC 7	Plaque métallique de toiture	FDES EDILFIBRO			
GC 8	Barrière de limitation du site	Module de données environnementales générique par défaut MDEGD par Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages			
GC 9	Installation chantier	/	Données de transport calculée. Google MAPS Chêne-Chaufontaine	/	/
GC 10	Démolition partielle du mur existant	/	Donnée d'excavation sur Agribalyse et données de transport Chauffontaine-CET Sprimont		
GC 11	Mise à sec	/	Données d'excavation estimée puis calculée sur Agribalyse. Donnée de pompage estimée puis calculée sur ELCD	/	/
GC 12	Déblais et chargement	/	Donnée du bordereau calculée avec Agribalyse		
GC 13	Curage du lit	/	Donnée du bordereau calculée avec Agribalyse	/	/
ELECTRO-MECANIQUE					
EM 1	Automat M 340	FDES Schneider			
EM 2	Interface machine 7.5''	FDES Schneider			
EM 3	Armoire électrique	FDES Schneider			
EM 4	Cable d'alimentation	FDES Nexan			
EM 5	Cable de raccordement génératrice-TGBT	FDES Nexan			
EM 6	Cable de mise à la terre	FDES Nexan			
EM 7	Relais de découplage	FDES Schneider			
EM 8	Variateur de fréquence	FDES Schneider			
EM 9	Néon	PEP Sarlam			
EM 10	Interupteur	PEP Legrand			
EM 11	Prise monophasée	PEP Legrand			
EM 12	Prise triphasée	PEP Legrand			
EM 13	Spot extérieur	PEP Sarlam			
EM 14	Variateur de fréquence altivar 312	PEP Schneider			
EM 15	Automate lmc 078 (dégrilleur)	PEP Schneider			
EM 16	Moteur de levage 1.5 kW	PEP ABB			
EM 17	Moteur de déplacement sur glissière 200 W				

EM 18	Moteur de fermeture de la pince 0.75 W				
Ferronnerie					
FE 1	Support de sonde	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 2	Grille entre-fer 120 mm	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 3	Pré-grille	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 4	Portique dégrilleur	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 5	Caillebotis	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 6	Gardes corps	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 7	Passerelle amont	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 8	Vanne de garde	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
FE 9	Dégrilleur automatique	Données fournisseur et calcul open LCA	Données internet et sous-traitant manutention	/	Calcul open LCA pour le recyclage
Turbinage					
TU 1	Vis hydrodynamique	Donnée fournisseur et calcul open LCA	Donnée sous-traitants et donnée open LCA	Données sous-traitants et calcul open LCA	Calcul open LCA pour le recyclage
TU 2	Boite de vitesse				
TU 3	Alternateur	PEP ABB	Donnée fournisseur et calcul open LCA	Données MTBE	Calcul open LCA pour le recyclage
Divers					
DI 1	Bouche de ventilation	PEP atlantic	PEP atlantic	Calcul MTBE et open LCA	PEP atlantic
DI 2	Thermostat de régulation				
DI 3	Convecteur	PEP Neomitis	PEP Neomitis	Calcul MTBE et open LCA	PEP Neomitis
DI 4	Kit de vidéo surveillance	PEP Schneider	PEP Schneider	PEP Schneider	PEP Schneider

Annexe 2 : métré du génie civil

Tableau 15 : Métré du génie civil(Zougrana, 2015)

Poste	Désignation	U	Qté
1			
1.1	Installation chantier	QF	1
1.2	Taille, coupe et élagage des arbres	QF	1
1.3	Démontage et évacuation des barrières type héras	QPm	55
1.4	Démolition partielle du mur existant	QPm3	9
1.5	Mise à sec	QF	1
2			
2.1	Déblais et chargement	QPm3	1200
2.2	Remblais de terre	QPm3	276
2.3	Curage du lit de la Vesdre au clairevoie (yc mise en CTA des galets)	Q.P to	600
2.4	Tri des déblais, mise en site autorisée et traitement des terres polluées suivant rapport d'analyses Alcontrol 12228976	QF	1
3			
3.2	Ouverture/fermeture de la tranchée pour la pose des câbles électrique , y compris sable	QPm	100
4			
4.1	Essai de sol sur le fond de coffre et sur la couche de forme après compactage à la plaque	QF	1
5			
	Sous-couche de la centrale		
5.1	Couche de forme	QPm3	60
5.2	Béton de propreté	QPm3	20
	Radier		
5.3	fourniture et mise en œuvre du radier R01 (canal turbine) yc bêche et partie verticale)	QPm3	51
5.4	fourniture et mise en œuvre du radier R02 (canal PAP)	QPm3	21
	Voile		
	Voile turbine		

5.5	fourniture et mise en œuvre du voile V02	QPm3	27,5
5.6	fourniture et mise en œuvre du voile V03	QPm3	1,25
5.7	fourniture et mise en œuvre du voile V04	QPm3	6,25
5.8	fourniture et mise en œuvre du voile V05	QPm3	4,25
5.9	fourniture et mise en œuvre du voile V06	QPm3	1
5.10	fourniture et mise en œuvre du voile V07	QPm3	1
	Voile passe à poissons		
5.11	fourniture et mise en œuvre du voile V01	QPm3	31,25
5.12	fourniture et mise en œuvre du voile V08	QPm3	0,8
5.13	fourniture et mise en œuvre du voile V09	QPm3	1
5.14	fourniture et mise en œuvre du voile V10	QPm3	1
5.15	fourniture et mise en œuvre du voile V11	QPm3	0,8
5.16	fourniture et mise en œuvre du voile V12	QPm3	0,8
5.17	fourniture et mise en œuvre du voile V13	QPm3	0,8
5.18	fourniture et mise en œuvre du voile V14	QPm3	0,8
5.19	fourniture et mise en œuvre du voile V15	QPm3	0,7
	Socle		
5.20	fourniture et mise en œuvre de S02	QPm3	0,9
5.21	fourniture et mise en œuvre de S01	QPm3	1,56
5.22	fourniture et mise en œuvre du béton des pieds de l'auge	QPm3	0,2
5.23	fourniture et mise en œuvre béton scellement vanne	QPm3	2
5.24	Rugosité dans les 9 bassins	QF	9
	Local technique		
5.25	M01 bloc de 14 cm	QPm2	13
5.26	M02 bloc de 14 cm	QPm2	11
5.27	M03 bloc de 14 cm	QPm2	5
5.28	fourniture et mise en œuvre de la dalle D01	QPm3	6
5.29	fourniture et mise en œuvre de la dalle D02	QPm3	6
5.30	fourniture et mise en œuvre de la toiture T01 (à retirer car 5.35)		
5.31	Double porte métallique 160/220 peinture thermolaquée y compris paire de béquilles, serrure standard, cylindre avec 3 clés, joint de calfeutrage en bas de porte	QP	1
5.32	Fenêtres fixes en PVC 100/100 double vitrage	QP	2
5.33	Ouverture dans la façade 50/50 cm pour ventilo	QP	1
5.34	Crépis sur murs extérieurs	QPm2	60
5.35	Toiture en panneaux sandwich isolés yc rives gouttières et tuyau de descente	QF	1

5.36	Ancrages chimiques d'armatures diam. 12mm dans béton armé existant	Op pièce	50
	Rampes		
5.37	Rampes d'accès à la rivière	QF	1
	Renforcement des berges		
5.38	Gabion renforcement des berges amont et aval	m3	70

Annexe 3 Liste des composants de la centrale.

Tableau 16 Liste des composants de la centrale (Rutten, 2017).

Numéro de F.T.	Dénomination	Unité	Quantité	Fournisseur
T	<u>Turbine</u>			
<i>T10</i>	<i>Appareils et accessoires de vannage</i>			
T101	Actuateur vanne de garde T401 (vérin hydraulique)	Q.P.	1	Perée SA
T102	Support de capteurs de fin de course, et de capteur de position continue	Q.P.	1	EMSD
T103	Capteurs de fin de course	Q.P.	2	EMSD
T104	Capteur de position continue (capteur à induction)	Q.P.	1	MTBE SA
<i>T20</i>	<i>Electricité: Tableau général basse tension (TGBT)</i>			
T201	Armoire électrique 75kW pour turbine à vis d'Archimède	Q.P.	1	EMSD
T203	Raccordement électrique au réseau yc pose sous le pont du chemin de fer et jusqu'au point de raccordement. Y compris gaine annelée et accessoires de fixation	Q.F.	1	EMSD
T204	Câble d'alimentation/injection compteur - TGBT	Q.P.m	220	
T205	Câble de raccordement de la génératrice au TGBT	Q.P.m.	8	
T206	Câble de mise à la terre	Q.P.	50	
T207	Relais de découplage	Q.P.	1	EMSD
T209	Electricité tertiaire avec 1 point d'éclairage néon, 1 prise monophasée, 1 prise triphasée	Q.P.	1	
T210	Variateur de fréquence 75kW	Q.P.	1	MTBE SA
<i>T30</i>	<i>Ferronnerie</i>			
T301	Support de sonde de niveau	Q.P.	2	EMSD
T302	Grille large entrefer 120 mm en galva	Q.P.	1	EMSD
T303	Pré-grilles à mailles larges	Q.P.	1	EMSD
T304	Portique du dégrilleur avec préau	Q.P.	1	EMSD
T305	Caillebotis hors pap	Q.P.m2	15	EMSD
T306	Poutre de manutention	Q.P.	1	EMSD
T307	Passerelle amont grille en caillebotis	Q.P.	1	EMSD
	<u>Options</u>			
	caillebotis sur pap	Q.P.m2.	59,5	EMSD
	Gardes-corps standard en galva	Q.P.m.	50	EMSD
<i>T40</i>	<i>Ferronnerie spécialisée</i>			
T401	Système de vannage en galva (Cadre + corps de vanne)	Q.P.	1	EMSD
T401V	Corps de vanne 401	Q.P.	1	EMSD
T401C1	Cadre de vanne 401	Q.P.	1	EMSD
T401C2	Support du vérin déporté	Q.P.	1	EMSD
T403	Lame siphonide de protection d'entrée de la passe à poissons	Q.P.	1	EMSD

<i>T50</i>	<i>Régulation et architecture commande/contrôle</i>			
T501	Automate principal M340	Q.P.	1	Schneider
T5011	Rack pour automate M340 8 emplacements	Q.P.	1	Schneider
T5012	Alimentation 24Vdc	Q.P.	2	Schneider
T5013	Processeur	Q.P.	3	Schneider
T5014	Module de communication RJ45 Modbus TCP / IO Scanning	Q.P.	4	Schneider
T5015	Entrées digitales	Q.P.	5	Schneider
T5016	Sorties digitales	Q.P.	6	Schneider
T5017	Entrée / sorties analogiques	Q.P.	7	Schneider
T5018	Câble pour entrées / sorties digitales	Q.P.	8	Schneider
T5019	Câble pour entrées / sorties analogiques	Q.P.	9	Schneider
T502	Switch pour architecture Ethernet	Q.P.	1	Schneider
T503	Human Machine Interface (HMI) 7,5"	Q.P.	1	Schneider
T504	Module de communication pour téléphone mobile et de télégestion (3G/4G) et de gestion des alarmes	Q.P.	1	ESCO Drives
T505	Analyseur réseau	Q.P.	1	EMSD
<i>T60</i>	<i>Sonde de niveau</i>			
T601	Sonde de niveau à ultrasons	Q.P.	2	MTBE
<i>T70</i>	<i>HVAC</i>			
T701	Ventilateur avec grille de protection contre les insectes et volet	Q.P.	1	Air-Trade Center
T702	Grille d'admission d'air	Q.P.	1	Air-Trade Center
T703	Thermostat pour l'enclenchement du ventilateur	Q.P.	1	EMSD
T704	Convecteur de mise hors gel 2000 W	Q.P.	1	EMSD
<i>T80</i>	<i>Turbine</i>			
T801	Vis Hydrodynamique	Q.P.	1	SPAANS
T802	Accouplement	Q.P.	1	SPAANS
T803	Multiplicateur	Q.P.	1	SPAANS
T804	Génératrice	Q.P.	1	SPAANS
T805	Frein	Q.P.	1	SPAANS
T806	Couverture de la vis par caillebotis	Q.P.	1	SPAANS
T807	Commission mécanique	Q.P.	1	SPAANS
T808	Sondes de température des enroulements de la génératrice (PTC ?)			
T809	Sonde de température de la boîte de vitesse (PT100)			
T810	2 Caméras de surveillance			
T811	Monitoring des éléments tournants (analyse vibratoire, 4 accéléromètres)	Q.P.	1	SPAANS/MTBE
<i>T90</i>	<i>Groupe Oléo-hydraulique</i>			
T901	Groupe Oléo-hydraulique pour l'action de la vanne de garde, du dégrilleur et du frein de la turbine	Q.P.	1	Perée SA
<i>T100</i>	<i>Divers</i>			
T1001	Dégrilleur automatique avec bras oléo-hydraulique	Q.P.	1	

T1002	Drôme en flotteurs PU renforcé avec déflecteur	Q.P.	85	ximéca
T1002	Containeur	Q.P.	1	MTBE

Annexe 4 : Données d'inventaire communiquées par Spaans Babcock

31982 - Chaudfontaine			
Activity	Equipment	Installed power (kW)	Netto up time (hrs)
Cutting	plasma cutter	22	27
Bending	flight bender	11	30
welding – manipulator	manipulator	1,5	10
welding – welding	welding machine	5,5	62
Machining	lathe	22	14
Machining	milling	22	4
rolling/bending	roller	11	24
shrinking shafts	oven	100	8
Assembly	induction heater	22	4
Other	cranes, fork lift etc.	4	4
Blasting	compressor	90	12,5
Painting	compressor	90	8,75
Installation	Ford Transit diesel	1 ltr = 11 km	3 visits were carried out
Materials	Type	Amount	
steel	S235	11500	Kg
paint	Sigmashield 880	210	Ltr
gasses	Oxygen	1500	Ltr
	Argon	2000	Ltr
	Acétylène	1500	Ltr
Waste	Type	Amount	
Steel	S235	575	Kg
Paint	Sigmashield 880	21	Ltr
Blasting grit		2	Kg

Tableau 17 : Donnée d'inventaire communiquée par Spaans Babcock.(Keuning, 2017)

Annexe 5 calcul pour l'inventaire de cycle de vie

Génie civil

Béton

- ✓ Volume de béton nécessaire :

Somme de toutes les infrastructures en béton à partir du métré réalisé par (Zoungana, 2015)

- ✓ Quantité de matière nécessaire pour la fabrication du béton :
Multiplication du volume de béton par la composition volumique du béton armé

Tableau 18 : composition massique d'un m³ de béton (Bernard, n.d.)

	Ciment (kg)	Gravier (980)	Sable (kg)	Eau (l)
Béton armé	400	980	720	195

- ✓ L'énergie a été calculée à partir de (Encyclo-ecolo, 2011) et la quantité de transport a été calculée à partir de l'hypothèse de distance d'approvisionnement de 50 km et de la masse par m³ reprise dans le tableau ci-dessus (l'eau n'est pas reprise car non acheminée par camion).

Acier d'armature

- ✓ Calcul de la quantité d'acier nécessaire à partir de la densité annoncée dans le métré de (Zoungana, 2015)

$$100 \text{ kg/m}^3 \cdot 317 \text{ m}^3 = 31700 \text{ kg}$$

Bloc de béton

- ✓ Calcul à partir de la PEP (CERIB, 2017)

Porte

- ✓ Calcul à partir de la PEP (Le goff, 2012)

Fenêtre

- ✓ Calcul à partir de la PEP (CERIB, 2017)

Crépis

- ✓ Calcul à partir de la FDES (CERIB, 2017) et des dimensions du métré de (Zoungana, 2015)

Panneau de toiture

- ✓ Calcul à partir de la FDES (Edilfibro, 2015) et des dimensions du métré de (Zoungana, 2015)

Barrière de limitation du site

- ✓ Calcul à partir de la PEP (Ministère de l'Environnement de l'énergie et de la mer Ministère du logement et de l'habitat, 2014) et des dimensions du métré de (Zoungana, 2015)

Electromécanique

La partie électromécanique fait intervenir des produits dit actifs, c'est-à-dire qu'ils consomment des flux (principalement de l'énergie) durant leur vie en œuvre. Les données de ces sous-produits venant exclusivement de PEP, les scénarios décrits dans ces fiches ont été adaptés en fonction du temps effectif d'utilisation pour la centrale par l'application de la règle de trois. Les données sur les durées d'utilisation ont été fournies par Denis Rutten, responsable de la partie électromécanique. Les pertes d'énergie dus à l'effet Joules ont été négligées.

Référence	Sous-Produit	Référence bibliographique des données	
EM 1	Automate M340	(Schneider Electric, 2010a)	
EM 2	Switch ethernet	(Schneider Electric, 2010c)	
EM 3	Interface machine 7,5"	(Schneider Electric, 2010f)	
Electricité TGBT			
EM 4	Armoire électrique	(Schneider Electric, 2010b)	Produit passif
EM 5	Cable d'alimentation/injection compteur	(Domingo, L; Ezzahir, 2001)	Produit passif
EM 6	Cable de raccordement de la génératrice au TGBT	(Domingo, L; Ezzahir, 2001)	Produit passif
EM 7	Cable de mise à la terre	(Domingo, L; Ezzahir, 2001)	Produit passif
EM 8	Relais de découplage	(Schneider Electric, n.d.)	
EM 9	Variateur de fréquence	(Reimann, Paulsson, Wikström, & Weaving, 2013)	
Electricité tertiaire			
EM 11	Neon	(Legrand, 2014)	
EM 12	Interrupteur	(Legrand, 2013)	Produit passif
EM 13	prise monophasée	(Esus, Añola, & Abangon, 2001)	Produit passif
EM 14	prise triphasée	(Legrand, n.d.)	Produit passif
EM 15	spot extérieur	(Sarlam, 2000)	
Dégrilleur			
EM 16	Variateur de fréquence Altivar 312	(Schneider Electric, 2010g)	
EM 17	Automate	(Schneider Electric, 2010d)	
EM 18	Moteur 1,5 kW	(ABB, 2002)	
EM 19	Moteur 200 W	(ABB, 2002)	
EM 20	Moteur 0,75 W	(ABB, 2002)	

Ferronnerie

Les calculs pour la partie ferronnerie ne concernent que le transport avec une hypothèse de 1000 km pour l'approvisionnement du métal et 50 km pour la livraison de l'atelier de fabrication au chantier (distance calculée sur google maps) et l'énergie de recyclage qui a été calculée selon les économies d'énergie engendrée par rapport à la production. L'économie d'énergie provient de (CNRS, 2014) et l'énergie de production de (Greendelta, 2009). Les données de matières et d'énergies ont été directement fournies par EMSD.

Turbinage

Vis hydrodynamique

Les données de matières, énergie et déchets ont été directement fournies par Spaans Babcock. La distance de livraison a été calculée sur google mapps. L'énergie de recyclage du métal a été calculée sur base de deux données. Premièrement, l'énergie nécessaire à la production d'un kilogramme d'acier (Greendelta, 2009) et deuxièmement, l'économie d'énergie réalisée par le recyclage de l'acier (CNRS, 2014). $\text{Production} * (1 - \text{économie}) = \text{recyclage}$. Le calcul du flux de diesel pour la manutention a été calculé comme suit.

$$\text{Energie consommée} = \text{distance de transport de la grue} * \text{consommation selon la distance} + \text{durée de manutention} * \text{consommation à l'heure.}$$

Boite de vitesse

Les calculs concernant la boite de vitesse ne portent que sur la mise en œuvre et la fin de vie.

- ✓ La mise en œuvre a été calculée par rapport à la distance de livraison qui a été estimée à 1000 km comme hypothèse et par rapport à la durée de manutention dont le flux énergétique lié à ce processus a été calculé comme suit.

Energie consommée = distance de transport de la grue* consommation selon la distance + durée de manutention*
consommation à l'heure.

- ✓ L'énergie de recyclage du métal a été calculé sur base de deux données. Premièrement l'énergie nécessaire à la production d'un kilogramme d'acier (Greendelta, 2009) et deuxièmement, l'économie d'énergie réalisée par le recyclage de l'acier (CNRS, 2014)

Alternateur

- ✓ Calculs à partir de la PEP (Laatu, 2002) et adaptation des valeurs exprimées en unité/kW à la puissance du générateur. Le remplacement des roulements durant la vie en œuvre a été négligé.
- ✓ L'énergie de recyclage du métal a été calculé sur base de deux données. Premièrement l'énergie nécessaire à la production d'un kilogramme d'acier (Greendelta, 2009) et deuxièmement, l'économie d'énergie réalisée par le recyclage de l'acier (CNRS, 2014)

Divers

Bouche de ventilation

- ✓ Données de production par la PEP
- ✓ Données de mise en œuvre par la PEP
- ✓ Données de vie en œuvre :

Calculs des besoins en ventilations

L'enjeu de ce calcul est d'estimer sur 30 ans, la consommation électrique de la bouche de ventilation pour assurer une température dans le local technique inférieure à 35°C.

Pour se faire, un calcul simplifié du bilan thermique du local fût réalisé. En fonction de ce bilan, la température critique de mise en marche de la bouche de ventilation fût calculée.

Sur base des données climatiques de Uccle, le nombre d'heures sur une année où la température ambiante dépasse la température critique de fonctionnement de la ventilation fût calculée.

Le nombre d'heures de fonctionnement de la bouche d'aération a été multiplié par sa puissance pour avoir la consommation électrique annuelle. Enfin, la consommation annuelle a été multipliée par 30 pour avoir la consommation sur l'ensemble du cycle de vie.

Hypothèses de départ		
Puissance moyenne en sortie d'alternateur	30	kW
Perte d'énergie par le trou de passage de la vis	0,04	kW/k
Question : Estimer la consommation de la bouche d'aération sur une durée d'un an		
Données		

Radiation solaire	1000	W/m ²
Coefficient d'absorption solaires par les panneaux de toiture	0,91 ⁴	
Chaleur massique de l'acier de toiture	450	J/kg*K
Densité métal	7800	kg/m ³
Epaisseur des plaques en métal	0,003	m

Caractéristiques thermiques de l'enveloppe du local technique.

Tableau 19 : caractéristiques thermique des matériaux (Energie+, n.d.)

Pertes condition couvertes						
Parois	Surface (m ²)	Epaisseur (m)	λ (W/m*k)	R (m ² *K/W)	U (W/m ² *K)	Déperditions (W/K)
Crépis	40	0,03	1,5	0,02	6,629491945	265,3496778
Bloc	40	0,14	1,07	0,130841121		
Porte	4				1,5	6,17
Dalle	16	0,2			2,6	41,6
Fenêtre	2				3	6,17
Toiture	16	0,03	0,045	0,666666667	1,5	24,17
Trou de passage de la vis	0,5					40
somme						383,4596778

Pertes condition dégagée						
Parois	Surface (m ²)	Epaisseur (m)	λ (W/m*k)	R (m ² *K/W)	U (W/m ² *K)	Déperditions (W/K)
Crépis	40	0,03	1,5	0,02	6,629491945	265,3496778
Bloc	40	0,14	1,07	0,130841121		
Porte	4				1,5	6,17
Dalle	16	0,2			2,6	41,77
Fenêtre	2				3	6
Trou de passage de la vis	0,5					40
Somme						359,2896778

Gains thermiques

- ✓ Alternateur et boite de vitesse

Tableau 20 : production de chaleur par les alternateur et boite de vitesse (Rutten, 2017)

	Boite de vitesse	Alternateur	
Rendement	0,95	0,95	
Déperdition (W)	1575	1500	3075

⁴ Architecture et Climat - Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI) – Université catholique de Louvain (Belgique)

La puissance électrique en sortie d'alternateur est estimée à 30 kW. L'énergie thermique produite par l'alternateur en fonction de son rendement est de :

$$30\,000 * (1-0.95) = 1500 \text{ W}$$

La puissance mécanique à la sortie de la boîte de vitesse est donc de :

$$30\,000 * 1.05 = 31500 \text{ W}$$

A partir de cette puissance, on peut calculer les pertes en chaleur par la boîte de vitesse :

$$31\,500 * (1-0.95) = 1575 \text{ W}$$

Les gains internes sont donc de 3075 W. Les déperditions étant de 359 W/K, on peut calculer la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur pour laquelle la ventilation doit se mettre en marche.

$$3075/359 = 8.55 \text{ K}$$

Comme la température de consigne à ne pas dépasser est de 35°C, la ventilation doit se mettre en fonctionnement dès que la température extérieure est supérieure à 26.4°C

Selon les données météorologiques de la station de mesure de Uccle, cela représente 27 heures par an et donc 810 heures de fonctionnement sur l'année.

La puissance de la bouche d'aération étant de 2500 W, cela représente une énergie électrique de 2025 kWh

Thermostat de régulation thermique

- ✓ Calcul à partir de la pep (Schneider Electric, 2010h)

Convecteur

Besoins de chaleur

La température de consigne pour le local technique à respecter est de 0°C. En fonctionnement, cette température n'est jamais atteinte.

Les pertes sont en conditions extrêmes estimées à 359 W/K*10K= 3590 W en condition extrême (à savoir -10°C à l'extérieur)

Tandis que les gains sont estimés à 4100 W avec une puissance de production de 40 kW et les rendements cités ci-dessus pour l'alternateur et la boîte de vitesse.

Toutefois, il se peut que lorsque les conditions de température sont inférieures à -5°C, de la glace se forme sur la vis ou sur l'aube et qu'il faille arrêter la centrale pour préserver les matériaux.

Le calcul consiste donc à compter le nombre d'heures où la température est en dessous de -5°C selon les données météorologiques d'Uccle et de les multiplier par la puissance du convecteur pour connaître l'énergie utilisée durant la vie en œuvre du convecteur.

Le nombre d'heures est de 63 et l'énergie consommée est donc de 63h/an * 2000W*30ans=378kWh.

Critique du calcul

Ces calculs furent réalisés pour se donner une idée de la consommation des dispositifs de régulations de l'atmosphère intérieur du local technique. Ils ne reflètent pas une réalité exacte et ils souffrent de plusieurs approximations et négligences.

La radiation dans ce calcul fut en partie ignorée. Si elle n'est pas prise en compte dans les gains solaires, elle est toutefois prise en compte dans les pertes de l'enveloppe. En effet, les pertes par la toiture sont volontairement ignorées car en condition ensoleillée (la plupart du temps quand la température extérieure est de 26°C) il n'y a pas de pertes de chaleur par un toit sombre et ensoleillé. L'environnement extérieur n'est pas non plus pris en compte pour les ombrages étant donné que l'on ne prend pas les gains par rayonnement solaire.

Pour le chauffage, l'hypothèse de la formation de glace est issue d'une observation sur un court terme étant donné que la centrale n'est installée que depuis 2016.

Les caractéristiques thermiques de l'enveloppe souffrent d'une grosse approximation en ce qui concerne le trou de passage de la vis. N'ayant trouvé aucune source sur ce genre d'éléments, il a fallu faire une estimation sur base des propriétés thermiques des matériaux.

Kit de vidéo surveillance

- ✓ Calcul à partir de la PEP (Schneider Electric, 2012).