

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE

ENSMM-annaba-



DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

Mémoire de fin d'études

INGENIEUR

THEME :
ANALYSE DE CYCLE DE VIE D'UNE USINE :
ETUDE DE CAS – STEP DE GUELMA

Présenté(e) par : - Mlle. BOUFAS Rym Asma

Encadré(e) par : - Dr. BELHANI Mehdi

- Mr. BOUDJAHM Fayçal (tuteur de stage)

Membres du jury : - Dr. BENDJEDOU LOUIZA

Président

- Mme. LEMBOUB SAMIA

Rapporteur

Juin 2016

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE

ENSMM-annaba-



DÉPARTEMENT GÉNIE MINIER

Mémoire de fin d'études

INGENIEUR: Génie des Minier

THEME :
ANALYSE DE CYCLE DE VIE D'UNE USINE :
ETUDE DE CAS – STEP DE GUELMA

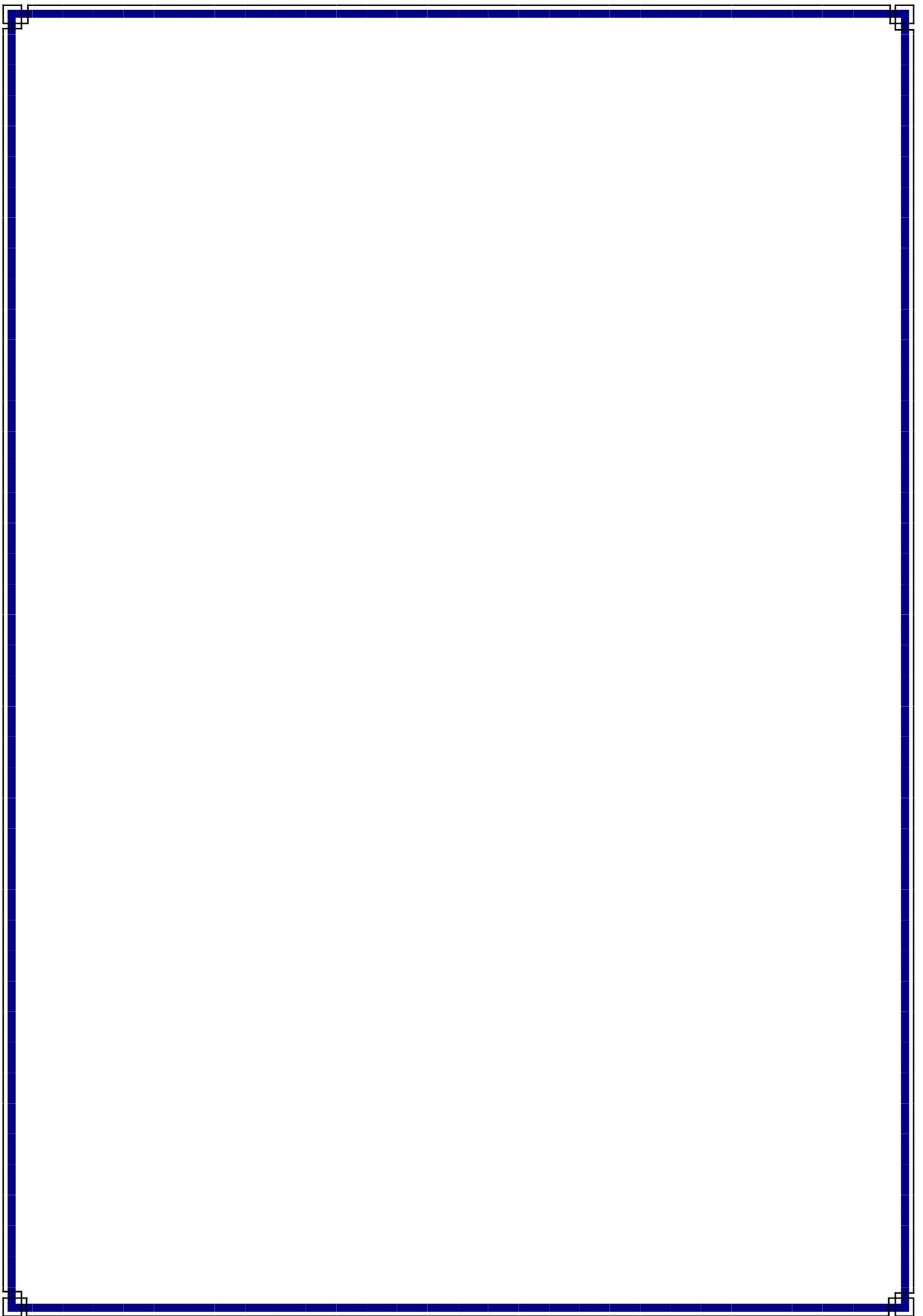
Présenté(e) par : - Mlle. BOUFAS Rym Asma

Encadré(e) par : - Dr. BELHANI Mehdi
- Mr. BOUDJAHM Fayçal (tuteur de stage)

Membres du jury : - Dr. BENDJEDOU LOUIZA Président

- Mme. LEMBOUB SAMIA Rapporteur

Juin 2016



Résumé :

Ce travail rentre dans le cadre de la mesure des impacts environnementaux par une analyse systématique ACV, dans une étude comparative entre différents scénarii intégrés dans une Symbiose industrielle. L'objectif est de rechercher un recyclage et une valorisation optimaux des déchets. Nous montrons la nécessité de mener ce genre d'analyse sur les segments industriels algériens afin de construire une base de données exhaustive de l'inventaire et d'améliorer leurs qualités. L'ACV menée sur l'usine de traitement de Guelma a montré que son bilan environnemental pourrait être amélioré par une valorisation énergétique et nutritive des boues. Le recyclage des eaux usées en irrigation ou en industrie serait le défi des exploitants et les collectivités locales dans les années à venir.

Mots-clés : ACV, Recyclage et valorisation, Symbiose industrielle, Usine de traitement

Abstract

This work falls within the framework of the measurement of environmental impacts by a systematic analysis ACV, in a comparative study between different integrated scenarios in an industrial symbiosis. The objective is to find a recycling and a valorization optimal waste. We show the need to conduct this kind of analysis on industrial segments Algerians in order to build a comprehensive database of the inventory and improve their qualifications. The ACV carried out on the treatment plant of Guelma has shown that its environmental balance could be improved by a recovery of energy and nutrients of the sludge. The recycling of wastewater in irrigation or in industry would be the challenge of operators and the local communities in the years to come.

Key words: ACV, recycling and valorization, industrial symbiosis, treatment plant

Dédicace

Que ce travail témoigne de mes respects :

A mes parents :

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mon frère Mohamed Soufiane ,A mes sœurs Aya,Amani,Hannene,Hayet

Meryeme,Romaissa,Sameh,Souad,Souheila,Soulef.A mon grand père à qui je souhaite un bon rétablissement .A la famille BOUFAS et BOUNOUR. Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.

A tous mes professeurs : Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.

A tous mes amis et mes collègues : Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.

RYM ASMA BOUFAS

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Au terme de ce travail, J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie Mr.Mehdi Belhani docteur à l'école supérieur des mines et métallurgie

En tant qu'encadreur de mon mémoire, il m'a guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer.

Je remercie spécialement Mr.Faycel Boudjahem directeur de la STEP de Guelma en tant que tuteur de mon stage qui m'a aidé en me fournissant des données précises concernant mon travail.

j'adresse mon sincère remerciement à madame Samia Lemboub pour avoir accepté la tâche de rapporter mon travail de mémoire.

Je tiens à remercier Madame Louiza Benjedou pour avoir présidé mon jury de mémoire.

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire.

Sommaire

Résumé	1
Dédicace	2
Remerciement.....	3
Liste des tableaux.....	8
Liste des figures.....	9
Symbole.....	11
Présentation de l'Office National d'Assainissement.....	12
I. Introduction Générale.....	13
II. Etat de l'art.....	15
1. Introduction.....	15
2. Impacts environnementaux.....	19
2.1 Impacts globaux.....	19
2.1.1 Réchauffement climatique (effet de serre).....	19
2.1.2 Dégradation de la couche d'ozone.....	20
2.1.3 Epuisement des ressources naturelles.....	21
2.2 Impacts régionaux.....	21
2.2.1 Pollutions photochimiques (smog d'été).....	21
2.2.2 Acidification.....	21
2.2.3 Eutrophisation.....	22
2.3 Impacts locaux.....	22
2.3.1 Toxicité humaine.....	22
2.3.2 Ecotoxicité.....	23
III. Analyse de Cycle de Vie d'une Usine.....	24
1. Introduction.....	24
2. Historique de l'ACV.....	26
3. Cadre méthodologique de l'ACV.....	27
3.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	27
a) Définition des objectifs de l'étude :	27
b) Définition du champ de l'étude :	28
i. L'unité fonctionnelle (UF) :	28
ii. Les frontières de chaque système étudié :	29
iii. Règles d'affectation :	29

iv.	Types des données et leurs collectes :	30
v.	Les exigences sur les données de l'inventaire :	30
vi.	Limitations de l'étude :	30
vii.	Choix des catégories d'impacts : voir la 3 ^{ème} étape	31
viii.	Choix de la méthode et modèles d'évaluation de ces impacts :	31
ix.	Le type de revue critique :	31
3.2	Analyse de l'inventaire du cycle de vie.....	31
3.3	Evaluation d'impacts environnementaux.....	31
3.4	Interprétation et recommandation.....	34
4.	Application de l'ACV à l'industrie de gestion des déchets.....	36
IV.	Etude de Cas – Analyse de Cycle de Vie de la STEP de Guelma.....	36
1.	Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	36
1.1	Définition des objectifs.....	36
1.2	Définition du champ de l'étude.....	36
1.2.1	Frontière du système sous l'étude.....	36
1.2.2	Unité fonctionnelle.....	37
1.2.3	Description de l'usine d'épuration.....	37
1.2.4	Logiciel et méthode.....	39
1.2.5	Impacts évalués.....	40
1.2.6	Hypothèses et qualité des données	40
1.2.7	Règles d'affectation.....	41
2.	Analyse de l'inventaire.....	41
2.1	Phase de construction.....	41
2.2	Phase d'exploitation.....	41
V.	Analyse d'impacts environnementaux de la STEP de Guelma.....	44
1.	Analyse d'impacts environnementaux.....	44
1.1	Comparaison scénario de référence A et le scénario B.....	44
1.2	Comparaison scénario B et C.....	48
1.3	Comparaison scénario C et D.....	49
1.4	Comparaison scénario C, D et E.....	50
1.5	Analyse du cycle de vie du scénario C.....	51
2.	Analyse de sensibilité.....	52
2.1	Recyclage des boues en Cimenterie et des eaux traitées en Irrigation..... ;;	52
2.2	Analyse de sensibilité sur le Mix-énergétique.....	54
3.	Analyse d'incertitude.....	56
4.	Interprétations.....	57

VI. Conclusions et perspectives.....	60
Bibliographie.....	61
Annexes	

Liste des tableaux

Tableau 1 : Chronologie des prises de décisions de la soutenabilité [3].....	15
Tableau 2 : Classification des impacts potentiels [4].....	23
Tableau 3 : Scénarii comparées sous l'étude.....	36
Tableau 4 : source chiffres clés de Sonelgaz pour l'année 2011.....	40
Tableau 5 : source chiffres clés électricité et gaz pour l'année 2011.....	41
Tableau 6 : mix- énergétique algérien publié en l'année 2011.....	41
Tableau 7 : Paramètres de l'eau à l'entrée de la STEP.....	41
Tableau 8 : Paramètres de l'eau à la sortie de la STEP.....	42
Tableau 9 : Valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.....	42
Tableau 10 : Scénario de transport des boues vers les terres arables.....	42
Tableau 11 : concentrations des ETM dans les boues.....	43
Tableau 12 : paramètres agronomiques dans les boues.....	43
Tableau 13 : Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées.....	53
Tableau 14 : Evolution et origines des émissions de métaux lourds dans l'air en France.....	59

Liste des figures

Figure 1 : Interconnexion entre les trois dimensions de la durabilité [4].....	15
Figure 2 : Organisation de l'entreprise au cœur du marché et de la société.....	16
Figure 3 : Symbiose industrielle potentielle pour les villes d'Annaba-Guelma-Skikda.....	16
Figure 4 : Relations entre l'ACV et d'autres outils d'aide à la décision [3].....	18
Figure 5 : Echelles d'impacts environnementaux.....	19
Figure 6 : Cycle de vie d'un produit [3].....	24
Figure 7 : Cycle de vie d'un produit.....	24
Figure 8 : Cycle de Vie d'une Usine.....	25
Figure 9 : Modèle conceptuel de l'ACV [3].....	25
Figure 10 : Cibles atteintes par les impacts environnementaux [3].....	25
Figure 11 : Cadre méthodologique de l'ACV [4].....	27
Figure 12 : Fonction d'une usine de production et de traitement.....	29
Figure 13 : Evaluation d'impact d'un système [3].....	32
Figure 14 : chaîne d'impact d'un flux élémentaire [4].....	32
Figure 15 : Evaluation d'impacts environnementaux de deux scénarii A et B [3].....	33
Figure 16 : Analyse par contribution des différent processus d'un système pour l'impact X.....	33
Figure 17 : Etapes de l'évaluation des impacts [4].....	34
Figure 18 : Différentes étapes du service de gestion des déchets [3].....	35
Figure 19 : Frontières des systèmes choisies pour l'étude.....	37
Figure 20 : Schéma descriptif de l'Usine étudié.....	39
Figure 21 : Comparaison des impacts des scénarii A et B.....	44
Figure 22 : Contribution des modules du scénario B dans l'impact d'acidification.....	45
Figure 23 : Contribution des modules du scénario B dans l'impact d'eutrophisation.....	45
Figure 24 : Contribution des substances dans l'impact d'eutrophisation du scénario B.....	46
Figure 25 : Contribution des substances dans l'impact d'écotoxicité d'eaux douces du scénario B.....	46
Figure 26 : Contribution des substances dans l'impact d'écotoxicité terrestre du scénario B.....	47
Figure 27 : comparaison des scénarii A et B avec la méthode IMPACT 2002+.....	47
Figure 28 : Comparaison en score unique des scénarii A et B par la méthode IMPACT 2002+.....	48
Figure 29 : comparaison des scénarii B et C par la méthode CML.....	48
Figure 30 : comparaison des scénarii B et C par la méthode IMPACT 2002 +.....	49
Figure 31 : Comparaison des scénarii C et D par la méthode CML.....	49

Figure 32 : comparaison des scénarii C et D par la méthode IMPACT 2002+.....	50
Figure 33 : comparaison des scénarii C, D et E avec la méthode CML.....	51
Figure 34 : Comparaison des scénarii C, D et E avec la méthode IMPACT 2002+.....	51
Figure 35 : comparaison de la phase de construction et d'exploitation du scénario C.....	52
Figure 36 : comparaison des scénarii F, C et E par la méthode de CML.....	53
Figure 37 : comparaison des scénarii F, C, E et A par la méthode de IMPACT 2002+.....	54
Figure 38 : comparaison des scores uniques F, C, E et A par la méthode de IMPACT 2002+.....	54
Figure 39 : Comparaison des scénarii C, E, F et G avec la méthode CML.....	55
Figure 40 : Comparaison des scénarii C, E, F et G avec la méthode IMPACT 2002+.....	55
Figure 41 : Scores uniques des scénarii C, E, F et G par la méthode IMPACT 2002+.....	55
Figure 42 : Analyse d'incertitude du scénario C.....	56
Figure 43 : Analyse d'incertitude sur le critère de l'acidification du scénario C.....	56
Figure 44 : Analyse d'incertitude comparative entre les scénarii C et E.....	56

Symbole

ACV	Analyse de Cycle de Vie
AFS	Analyse des flux d'une substance
AR	Analyse de risque
AFM	Analyse de flux de matière
BC	Bilan carbone
EIE	Etude d'impact environnementale
ONA	Office National de l'Assainissement
E.P.I.C	Etablissement public national à caractère industriel et commercial
SQM	système de management de la qualité
HSE	hygiène sécurité environnement
SME	systèmes de management environnementaux
SMI	Systeme de Management Intégré
CFC	les chlorofluorocarbures
HFC	les hydrofluorocarbures

Présentation de l'Office National d'Assainissement

Placé sous la tutelle du Ministère des Ressources en Eau et de l'Environnement, l'Office National de l'Assainissement (ONA) est un établissement public national à caractère industriel et commercial (E.P.I.C), créé par décret exécutif n° : 01-102 du 21 Avril 2001.[1]

Suite à l'audit externe réalisé par le bureau international accrédité TÜV Rheinland en décembre 2007, l'ONA s'est vu attribuée le certificat ISO selon le référentiel ISO 14001.

L'ONA se substitue à l'ensemble des établissements et organismes publics, nationaux, régionaux et locaux en charge du service public de l'assainissement, notamment :

- L'Agence Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement (AGEP)
- Les établissements publics nationaux à compétence régionale de gestion de l'assainissement.
- Les EPEDEMIA de wilaya ; les régies et services communaux de gestion des systèmes d'assainissement.

Dans le cadre de la mise en œuvre de la politique nationale de l'assainissement, l'Office National de l'Assainissement est chargé sur le territoire national, de l'exploitation, de la maintenance, du renouvellement, de l'extension et de la construction des ouvrages et des infrastructures d'assainissement. Ainsi, il assure :

- La protection et la sauvegarde des ressources et environnement hydrique.
- La lutte contre toutes les sources de pollution hydrique.
- La préservation de la santé publique.
- la maîtrise d'ouvrage et d'œuvre déléguée
- Etablir le cadastre des infrastructures de l'assainissement et en assurer sa mise à jour.

L'Office est également chargé de :

- Proposer au ministère de tutelle les mesures d'encouragement de l'état ou les incitations à caractère technique ou financier dans le domaine de l'assainissement.
- Entreprendre toutes actions de sensibilisation, d'éducation, de formation ou d'étude et de recherche dans le domaine de la lutte contre la pollution hydrique.
- Prendre en charge, éventuellement, les installations d'évacuation des eaux pluviales dans ses zones d'intervention pour le compte des collectivités locales.
- Réaliser des projets nouveaux financés par l'état ou les collectivités locales.
- L'Office étudie et propose à l'autorité de tutelle la politique de tarification et de redevances dans le domaine de l'assainissement et veille à son application. [1]

I. Introduction Générale

La majorité des énergies utilisées actuellement sont des énergies fossiles, des énergies minières et des ressources en eau.

Le développement de l'économie mondiale dans un monde aux ressources finies entraîne de fortes tensions sur l'approvisionnement en matières premières, qui rendent nécessaire d'une part la recherche d'une économie plus sobre à cet égard et d'autre part le recours à de nouveaux gisements à exploiter.

L'activité industrielle repose essentiellement sur la matière première à l'état brut telle que le minerai, les champs pétroliers et gaziers, les ressources en eau et les espaces de terre productrice requises pour assurer les besoins de la sphère économique. Ces matières premières subissent une première transformation sur le lieu de production pour la rendre propre à l'échange international utilisé dans la production des produits finis ou comme source d'énergie tels que la sidérurgie, la cimenterie, la céramique, le verre et le polymère qui génèrent des déchets dans l'eau et dans le sol et des émissions dans l'air ce qui conduit à une pollution à des niveaux extrêmes (les cours d'eau, les nappes phréatiques et les sources d'eau potable, réchauffement climatique)

En effet la croissance démographique avec les problèmes actuels, augmentation de la consommation d'eau et du trafic automobile ainsi que le revêtement d'habitation et la présence d'activité commerciale ont provoqué des facteurs de risques environnementaux.

Dans cette intention il est utile d'économiser l'énergie en sensibilisant les gens sur l'importance de l'environnement, faisant le lien avec les différents domaines d'étude et en utilisant des énergies plus propres qui consistent à remplacer les ressources non renouvelables par les ressources renouvelables (l'énergie solaire, l'éolienne,...), protégeant l'eau d'où la nécessité d'installer et développer des STEP pour le traitement et le recyclage des eaux usées et pluviales afin de réduire la pollution de manière efficace.

Ces mesures doivent être évaluées par des mécanismes systématiques très évolués qui nous permettent d'aboutir à une décision rationnelle et efficace tels que l'écologie industrielle et l'analyse de cycle de vie.

Ce mémoire a pour objectif de faire acquérir la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie, telle que préconisée dans les normes ISO et son application dans une usine. Il sera apporté une vision sur les enjeux scientifiques et industriels de l'Analyse de Cycle de Vie pour le contexte algérien. L'étude de cas sera portée sur une usine de traitement des eaux usées de la ville de Guelma, une partie du segment de traitement des déchets.

L'ACV est un outil d'éco-conception et d'aide à la décision qui permet de déterminer les transferts de pollutions et de quantifier les impacts environnementaux d'un système (procédé, produit ou

service) tout au long de son cycle de vie. L'analyse par contribution et les méthodes d'allocation permettent d'identifier les sous-systèmes devant être améliorés. Dans une politique de développement durable, le traitement des eaux usées et la gestion des déchets urbains occupent une place importante. Dans ce contexte, la ville de Guelma, s'est dotée depuis 2008 d'une STEP d'une capacité de 200 000 équivalent-habitant. L'objectif d'une STEP est de réduire l'impact d'eutrophisation et d'écotoxicité. Cependant, elle nécessite une consommation élevée en énergie et en produits chimiques.

Ce travail s'intègre dans une approche de simulation de l'analyse de cycle de vie des boues (métaux lourds) au niveau de la STEP de Guelma qui comporte six chapitres.

- Le premier chapitre constitué d'une synthèse générale
- Le second chapitre est consacré à l'état de l'art
- Le troisième chapitre regroupe la présentation de la méthode ACV
- Le quatrième chapitre consiste à l'étude de cas d'un procédé, ACV de la STEP de Guelma
- Le cinquième chapitre prend en charge l'analyse d'impact de la STEP
- Le sixième chapitre présente des conclusions et perspectives

II. Etat de l'art

1. Introduction

L'industrie est le premier responsable des dommages environnementaux que connaît notre planète. La protection de l'environnement et des ressources naturelles est une condition impérative pour assurer une croissance soutenue [2]. Ceci a obligé les entreprises à réorganiser leurs systèmes de production dès les années 70 vers une approche de développement durable, en passant par plusieurs étapes (tableau 1).

Jusqu'aux années 70	Les « trente glorieuses » • Produire...	
Années 70	Premier choc pétrolier : • produire à énergie minimum	Mesures curatives
Années 80	Catastrophes industrielles: • Produire en toute sécurité	Mesures préventives
Années 90	Implication des clients: • Produire de la qualité	
Années 2000	Implication des citoyens • Produire durablement	Gestion intégrée

Tableau 1 : Chronologie des prises de décisions de la soutenabilité [3]

Le développement durable avec ses trois dimensions (figure 1) est défini comme « *La nécessité de répondre aux besoins de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins* ».

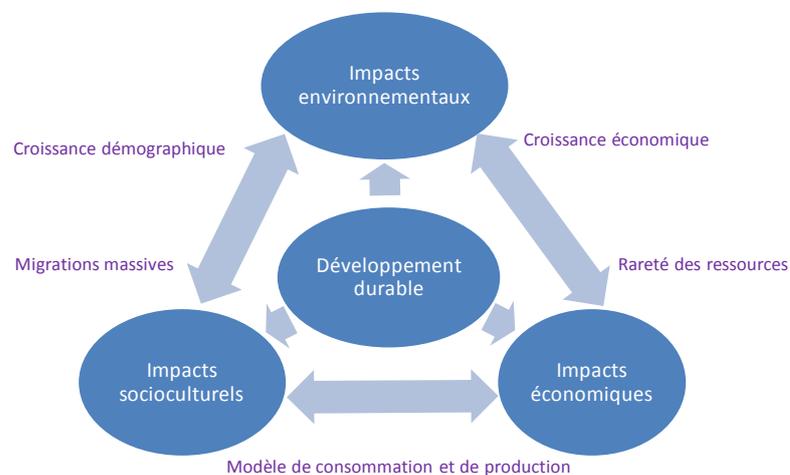


Figure 1 : Interconnexion entre les trois dimensions de la durabilité [4]

Les entreprises ont eu recours sous la pression du marché aux certifications afin de pérenniser leurs positions et compétitivités par l'adaptation des systèmes de management et d'organisation des entreprises (SQM, HSE, SME) (figure 2).

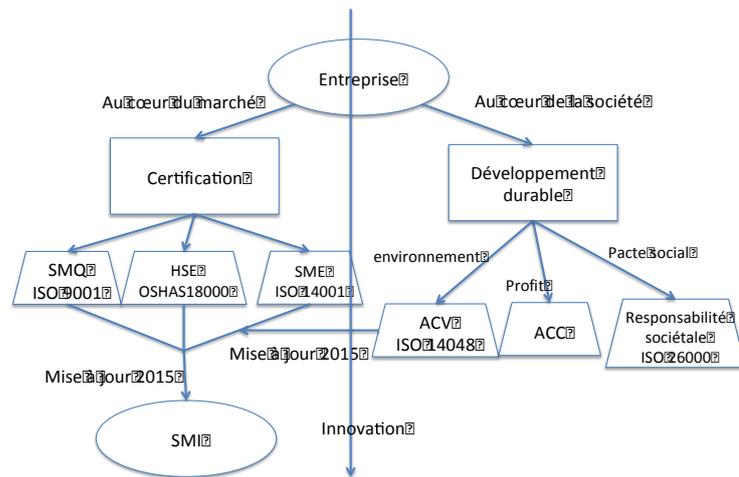


Figure 2 : Organisation de l'entreprise au cœur du marché et de la société

L'intérêt pour une entreprise d'utiliser un Système de Management Intégré (SMI) permet de :

- constituer un avantage concurrentiel conséquent et une reconnaissance des autorités,
- répondre aux exigences d'acheteurs potentiels, d'investisseurs et de clients,
- permettre d'optimiser les processus de l'entreprise, d'améliorer et d'organiser la communication et de redynamiser la démarche qualité.
- permettre de maîtriser la consommation des ressources et la pollution et les coûts induits,

Les symbioses industrielles (figure 3), permet d'optimiser la consommation des ressources et minimiser les déchets où les déchets d'un processus servent comme de matières premières pour d'autres processus [4]. La modélisation des segments industriels tel un métabolisme biologique (métabolisme industriel) permettrait d'atteindre un recyclage continu des matières premières et diminuer leurs utilisations par unité de fonction (dématérialisation).

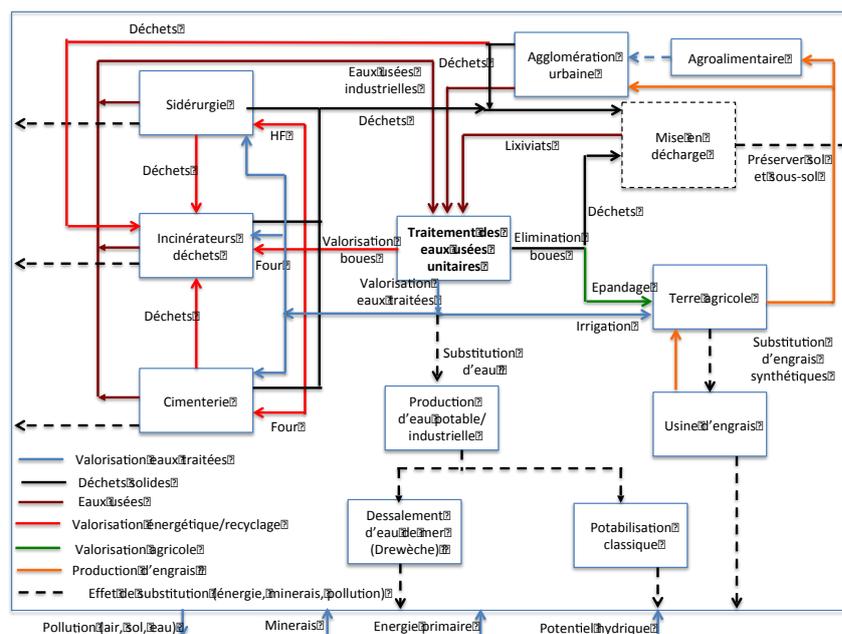


Figure 3 : Symbiose industrielle potentielle pour les villes d'Annaba-Guelma-Skikda

Jusqu'au début des années 90, les décideurs faisaient un choix unique en matière de traitement des déchets [5]: c'était l'époque du "tout-décharge", "tout-incinération" ou "tout-compostage". Aujourd'hui, le caractère hétérogène des déchets est pris en compte afin de rechercher un traitement optimal, en faisant appel à une combinaison de plusieurs techniques nécessitant parfois des transports intermédiaires.

Les choix des solutions techniques sont donc beaucoup plus complexes nécessitant des méthodes d'analyse adaptées afin de considérer le problème dans sa globalité. Les méthodes d'analyse environnementale ont ainsi considérablement progressé. Ces outils complexes se révèlent très utiles pour identifier et quantifier les conséquences d'une stratégie.

Il existe de nombreuses méthodologies d'analyse environnementale et de multiples outils permettant leur mise en œuvre. Ces différentes méthodes peuvent être ainsi classifiées selon plusieurs catégories. On distingue ainsi :

- Analyse des flux d'une substance (AFS, substance flow analysis)
- Analyse de risque (AR, Risk Assessment)
- Analyse de flux de matière (AFM, mass flow analysis)
- Bilan carbone (BC, Carbon footprint)
- Etude d'impact environnementale (EIE, Environmental Impact Assessment)
- **Analyse de Cycle de Vie (ACV)**

Parmi les outils précédents, l'ACV est la plus exhaustive [4] en tenant compte la totalité de la chaîne de production, le large intervalle espace-temps de l'occurrence de l'impact de la pollution, ses transferts et de ses effets multiples. L'ACV est basée sur une approche multicritère pour l'évaluation des impacts environnementaux.

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un moyen systématique [6] d'évaluation des impacts environnementaux globaux d'un système produit (un bien, une usine, un service) d'une entreprise. L'ACV identifie et quantifie la pression sur les ressources naturelles, et les transferts de pollution s'opérant entre les différentes phases de ce cycle de vie de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie. [7] Les approches des problèmes environnementaux se font par milieux : eau, air et sol et par trois modes de transfert [8]:

- Déplacement de la pollution d'un milieu physique à un autre (comme la production d'hydrogène pour véhicules à partir des carburants fossiles) ;
- Substitution d'une pollution par une autre ;
- Dispersion et/ou stabilisation différée d'une pollution (les déchets nucléaires, GES, HFC).

L'ACV est aujourd'hui au cœur des démarches d'éco-conception dans les entreprises.[9] La Figure 4 montre les relations entre l'ACV et d'autres outils d'aide à la décision.

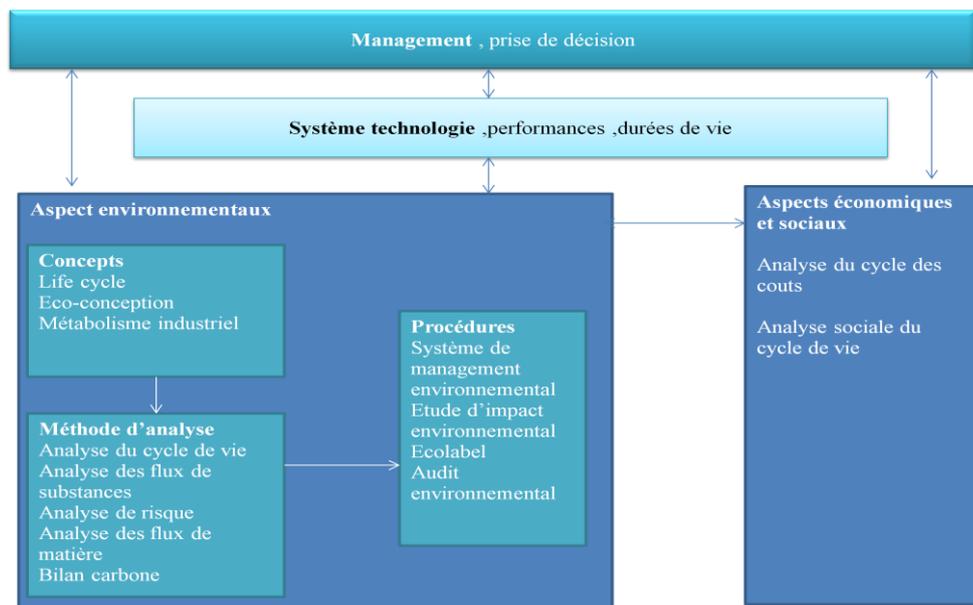


Figure 4 : Relations entre l'ACV et d'autres outils d'aide à la décision [3]

Les procédures comme l'écolabel, l'audit environnemental ou le Système de Management Environnemental se situent clairement en aval de l'ACV et peuvent se baser sur ses résultats.

La famille de normes ISO 14000 donne des outils pratiques aux entreprises qui souhaitent maîtriser leurs responsabilités environnementales.[10] La **norme ISO 14001** étant la plus utilisée, repose sur le principe de la roue de Deming de l'amélioration continue de la performance environnementale par la maîtrise des impacts liés à l'activité de l'entreprise. Plus de 300 000 certifications ISO 14001 ont été délivrées dans 171 pays.

La version révisée d'ISO 14001:2015 répond aux défis écologiques de notre planète en aidant les organisations à réduire leur impact environnemental et comprendre l'effet de l'environnement sur leurs activités. La mise à jour de septembre 2015 remplace la norme ISO 14001:2004. La norme ISO 14001:2015 propose une approche beaucoup plus stratégique du management de l'environnement. Les principaux changements retenus sont :

- **Protection de l'environnement**

La politique environnementale doit énoncer un engagement en faveur de la « protection de l'environnement », laquelle inclut la « prévention de la pollution » et d'autres engagements, tels que l'utilisation de ressources durables, l'atténuation des changements climatiques et l'adaptation à ces derniers, la protection de la biodiversité et des écosystèmes.

- **La performance environnementale**

L'entreprise doit décider de critères lui permettant d'évaluer ses performances environnementales, à l'aide d'indicateurs appropriés.

- **Réflexion environnementale axée sur le cycle de vie**

L'entreprise devra étendre son contrôle et l'influence de ses impacts environnementaux depuis l'acquisition/la génération des matières premières jusqu'à la valorisation des produits en fin de vie. L'entreprise devra tenir compte des étapes du produit/service pouvant être contrôlées ou influencées.

En 2016, la SLN est la première entreprise minière et métallurgique s'être certifiée ISO 14001 pour l'ensemble de son périmètre des mines de nickel à l'usine de transformation du minerai. [10]

L'ACV paraît comme l'outil par défaut pour une organisation stratégique d'une entreprise.

2. Impacts environnementaux

Les cibles visées par les conséquences environnementales des activités anthropiques définies par la norme sont :

- L'homme, la faune et la flore ;
- Le sol, l'eau, l'air, le climat et le paysage ;
- Les biens matériels et le patrimoine culturel ;
- L'interaction entre les cibles citées précédemment.

Les impacts environnementaux sont les perturbations et les effets (ou dommages) directs et indirects des pollutions générées par l'activité anthropique. Il y a un risque d'impact lorsque l'interaction entre un flux anthropique et tout ou une partie de l'environnement conduit à des modifications qualitatives, quantitatives et fonctionnelles de ce dernier (négatives ou positives). L'OCDE [11]. Distingue trois échelles d'impacts environnementaux : globale, régionale et locale (figure 5).

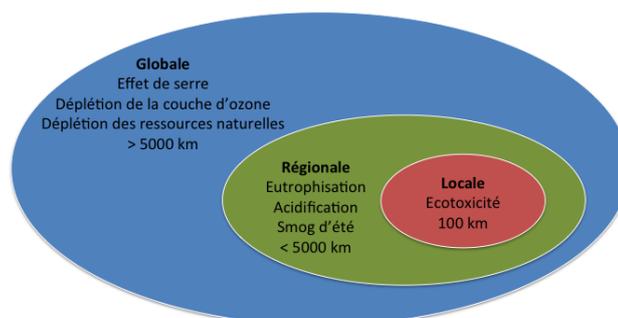


Figure 5 : Echelles d'impacts environnementaux

2.1 Impacts globaux

2.1.1 Réchauffement climatique (effet de serre)

Le réchauffement climatique global (ou planétaire) est l'augmentation de la température moyenne de la surface de la Terre (sol et eau) ainsi que de son atmosphère. Le vecteur responsable est l'effet de serre défini comme l'équilibre radiatif naturel qui se traduit par l'absorption par certaines molécules (appelées gaz à effet de serre, GES), présentes à l'état de trace dans la troposphère, du rayonnement infrarouge réfléchi par la surface de la terre. Ainsi, une partie de l'énergie solaire est

piégée dans la basse couche de l'atmosphère. Ce phénomène naturel permet de conserver une température propice à la vie de l'ordre de +15°C contre -18°C sans la présence des GES. L'intensification de cet effet par les émissions des GES est responsable du réchauffement climatique. Les principaux (GES) contribuant à ce phénomène sont le dioxyde de carbone (CO₂), la vapeur d'eau (H₂O), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les organo-halogénés, les fréons (CFC) et leurs substituts, les halons (HCFC), l'ozone (O₃), les composés organiques volatils (COV) et les oxydes d'azote (NO_x), les HFC (Hydrofluorocarbures), les PFC (Per-fluorocarbures) et SF₆ (Hexa fluorure de soufre).

L'augmentation annuelle des émissions du CO₂ d'origine fossile était de 26.4 Gt CO₂ entre 2000 et 2005 [4]. L'augmentation annuelle des émissions du CO₂ associées aux changements d'utilisation des sols était de 5.9 Gt CO₂ pendant les années 90 [12].

Le réchauffement climatique agit sur l'environnement physique de plusieurs façons :

- Augmentation la fonte des neiges et des glaciers et élévation du niveau de la mer
- Intensification de la force des ouragans et des cyclones
- Désertification des régions arides et semi-arides et l'assèchement de la majeure partie des régions subtropicales et plus de précipitations dans les hautes latitudes.
- Perturbation des écosystèmes et extinction de certaines espèces ;
- Perturbation de la chaîne alimentaire ;
- Des modifications profondes des modes de vie socioéconomiques et régimes politiques (sous-développement, migration, conflits géopolitiques, etc.) ;
- Propagation de virus et de maladies tropicales telles que la malaria, fièvre dengue et jaune [13].

2.1.2 Dégradation de la couche d'ozone

La couche d'ozone stratosphérique (au dessus de la troposphère) a pour effet d'absorber la plus grande partie du rayonnement solaire ultraviolet (UV), dangereux pour les organismes vivants. Les composés chlorés et bromés « les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrofluorocarbures (HFC) » sont les responsables essentiels. D'autres substances peuvent intervenir telles que CH₄ et NO₂, mais leur contribution relative reste encore non évaluée à cause de problèmes de synergie avec d'autres processus environnementaux, notamment celui de l'effet de serre [14]. Les CFC et HFC sont utilisés principalement dans l'industrie du froid, les bombes aérosols, les solvants pour l'industrie électronique, les mousses synthétiques et les agents extincteurs. Cet impact entraîne des effets sur la santé humaine (cancer, cataracte, coup de soleil et affaiblissement du système immunitaire) et perturbe la division cellulaire des microorganismes des écosystèmes terrestres et aquatiques.

2.1.3 *Épuisement des ressources naturelles*

Les ressources naturelles sont divisées en différentes catégories :

- Les minerais (métaux) ;
- Les granulats minéraux (sable, gravier, chaux, etc.) ;
- Les ressources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) ;
- Les ressources fissiles (uranium, plutonium, etc.) ;
- Les ressources environnementales (l'air, l'eau, le sol, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, la géothermie, l'énergie éolienne, etc.) ;
- Les ressources biologiques (cultures, bois, pêches, etc.).

On peut ainsi les répartir en deux grandes catégories : les non-renouvelables (abiotiques) et renouvelables (biotiques) qui dépendent de trois paramètres essentiels :

- La consommation mondiale de la ressource ;
- L'état des réserves de la ressource ;
- La renouvelabilité de la ressource : une ressource est renouvelable dans le cas où elle est inépuisable et reproductible dans un avenir prévisible à l'échelle humaine.

Si les réserves diminuent, ou si la consommation excède le taux de renouvellement de la ressource considérée, alors il y a menace d'épuisement. Il convient que l'impact de déplétion des ressources est fortement et directement corrélé aux autres impacts.

2.2 Impacts régionaux

2.2.1 *Pollutions photochimiques (smog d'été)*

Le phénomène est dû principalement aux rejets d'hydrocarbures et d'oxydes d'azote dans l'air quand les conditions météorologiques sont favorables (ensoleillement, changement rapide de température, situation anticyclonique). Ces rejets sont responsables de la formation d'oxydants toxiques (CO) et écotoxiques par voie photochimique dans la troposphère. L'ozone constitue le principal photo-oxydant [15]. On note l'effet synergique avec l'effet de serre et l'impact de destruction de la couche d'ozone. Le brouillard formé par les photo-oxydants renferme des acides (HNO_3 , H_2SO_4), des nitrates, des sulfates, des sels d'ammonium, des métaux, des composés carbonés oxydés et de l'eau. Le phénomène induit des effets sur la santé humaine : irritation des yeux et des voies respiratoires [15], des nausées et des toux [16].

2.2.2 *Acidification*

Ce phénomène est causé par les gaz acides rejetés dans l'air par les industries dont les principaux composés responsables sont les oxydes de soufre (SO_x), les oxydes d'azote (NO_x) et les gaz acides comme HCl et HF provenant du transport et les activités industrielles. Sous l'effet des courants atmosphériques, ils sont transportés et déposés sur le sol et l'eau sous forme humide (pluie,

brouillard, neige, grêle) ou sèche (poussières). Au contact de l'humidité, les SO_x se transforment en acide sulfurique (H₂SO₄) et les NO_x en acide nitrique (HNO₃).

Les pluies acides provoquent la corrosion des métaux et l'altération des édifices en pierre. Elles causent des carences nutritives et des augmentations en éléments potentiellement toxiques, induisant la diminution de la biomasse « forêts » et la mortalité de certaines espèces.

2.2.3 Eutrophisation

L'eutrophisation est l'apport excessif de nutriments organiques entraînant un déséquilibre des cycles biogéochimiques dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. Ce déséquilibre cause une croissance importante de certaines espèces au détriment des autres [14].

L'eutrophisation des écosystèmes terrestres est causée principalement par les émissions des transports routiers et aux émissions d'azote (facteur limitant pour la production de la biomasse) et de phosphore des terres agricoles [17].

L'eutrophisation des écosystèmes aquatiques se traduit par la prolifération excessive de végétaux aquatiques (algues, macrophytes et végétaux supérieurs tolérants à la pollution) et de phytoplanctons entraînant un appauvrissement en oxygène du milieu.

Le phosphore et l'azote proviennent de l'agriculture, par lixiviation des engrais, et des activités humaines (déjections humaines, détergents, industries) directement ou indirectement via les eaux usées urbaines et industrielles. De plus, les rejets des eaux de pluie des agglomérations urbaines entraînent dans les milieux naturels les dépôts au sol. La variabilité du pH cause la libération des cyanures [4].

2.3 Impacts locaux

2.3.1 Toxicité humaine

La toxicité humaine concerne l'action des polluants générés par les activités anthropiques et les processus naturels sur la santé de l'être humain. Les polluants concernés sont :

- Les microorganismes pathogènes : virus, bactéries, protozoaires, champignons, algues ;
- Les métaux lourds : mercure, plomb, cadmium, chrome, zinc, cuivre, nickel, etc. ;
- Les composés traces organiques : dioxines (PCDD) et furanes (PCDF), pesticides, PCB, hydrocarbures (HAP, organochlorés), perturbateurs endocriniens, etc. ;
- Les composés gazeux : ammoniac, hydroxyde de soufre, oxydes de soufre et d'azote, acides chlorhydrique et sulfurique, COV, poussières, CO, etc. ;

L'évaluation de la toxicité d'une substance doit tenir compte des paramètres toxicologiques d'exposition et d'effet. L'exposition peut se faire à travers trois voies [18] : l'ingestion, la pénétration cutanée et l'inhalation. Les effets de toxicité aiguë ou chronique peuvent être différents selon l'agent toxique, la personne exposée et le type de toxicité. Les effets peuvent être cancérogènes, allergiques ou causant des problèmes sur la mutation ou la reproduction.

2.3.2 Ecotoxicité

Les pollutions chimiques et biologiques ayant un effet néfaste sur la santé humaine l'ont également potentiellement sur la faune et la flore. On distingue l'écotoxicité pour les milieux aquatiques, les milieux terrestres et les sédiments. En ce qui concerne l'écotoxicité aquatique, on distingue le cas des eaux douces et celui des eaux de mer. Il convient à noter que l'évaluation de l'écotoxicité dépend essentiellement des caractéristiques du milieu récepteur et de la dispersion, de la persistance et de la dégradation de la substance (synergie).

Les effets des éléments traces métalliques sur la santé humaine et l'écosystème, leurs formes et leurs origines par segment industriel sont montrés dans les tableaux et en Annexe 3 et 4 .

Les impacts environnementaux sont regroupés par classe et sous-classe dans le tableau 2.

Dommage	Classe	Sous-classe	Echelle géographique de l'impact
Epuisement des ressources naturelles	Abiotique (non-renouvelable)	Energie fossiles	Globale et régionale
		Minerais	
	Biotique (renouvelable)	Forêts, etc.	
	Ressources en eau	Lacs, eaux souterraine, rivière.	
	Occupation de l'espace		
Impacts sur la santé humaine	Toxicité humaine	Aiguë, chronique, etc.	Locale
	Smog d'été		Régionale
	Nuisances	Auditives	Locale
		Olfactives	
Visuelles			
Impacts sur l'écosystème	Effet de serre		Globale
	Détérioration de la couche d'ozone ^a		Globale
	Ecotoxicité	Ecotoxicité aquatique et terrestre	Locale
		Eutrophisation aquatique et terrestre	Locale ou régionale
		Acidification	Régionale
Altération physique de l'écosystème		Locale ou régionale	

Tableau 2 : Classification des impacts potentiels [4]

III. Analyse de Cycle de Vie d'une Usine

1. Introduction

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), Life Cycle Assessment en anglais, est une méthode multi-processus d'évaluation d'impacts environnementaux de la totalité du cycle de vie d'un système du berceau à la tombe (to cradle to grave) (figure 6).

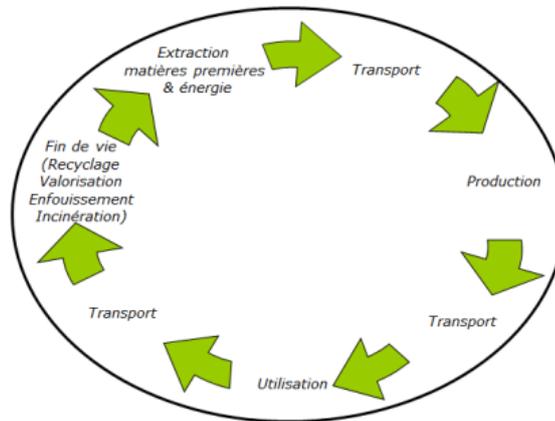


Figure 6 : Cycle de vie d'un produit [3]

Le cycle de vie d'un produit implique l'extraction et le traitement des matières premières, la production des produits intermédiaires, la fabrication du produit et son utilisation, la fin de vie du produit impliquant son recyclage et/ou sa valorisation et l'élimination final des déchets ultimes (figure 7).

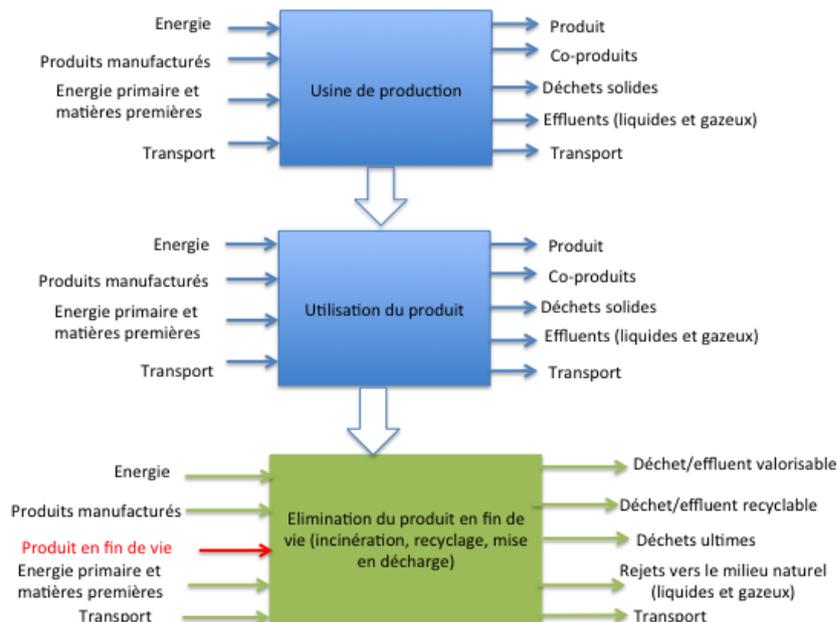


Figure 7 : Cycle de vie d'un produit

Le cycle de vie d'une usine (production ou traitement) contient sa construction, son exploitation et son démantèlement après cessation d'activité. Les deux cycles de vie du produit et de l'usine sont interconnectés où l'un fait appel à l'autre (figure 8).

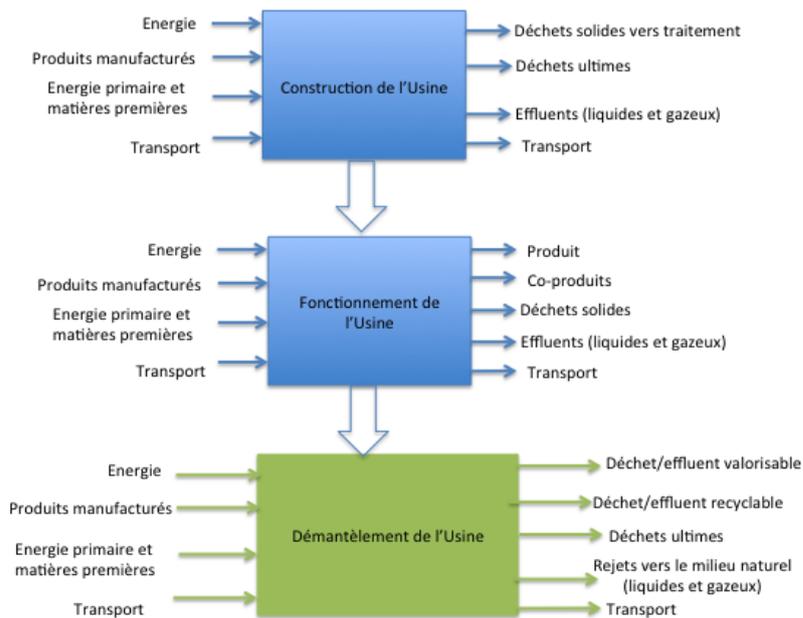


Figure 8 : Cycle de Vie d'une Usine

Une ACV consiste à déterminer tous les flux élémentaires échangés entre le système étudié et l'environnement et à calculer les impacts environnementaux associés à ces flux élémentaires. Toute matière extraite de la nature ou rejetée est appelée, flux élémentaire (figure 9).

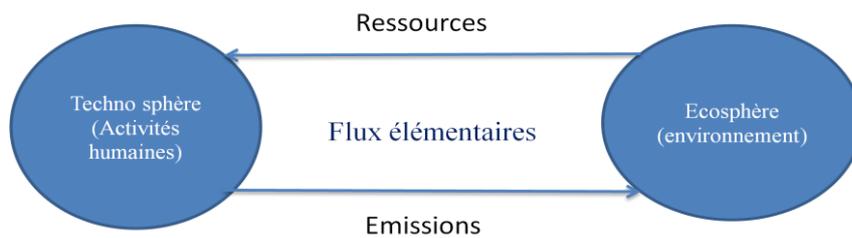


Figure 9 : Modèle conceptuel de l'ACV [3]

L'ACV établit un bilan quantitatif de tous les flux entrants (eau, énergie primaire, matières premières) et pollution atmosphériques et aqueuses et déchets, à chaque étape du cycle de vie du système. L'évaluation des impacts environnementaux est basée sur le principe de cause (activité anthropique) à effet sur les trois types de cibles (figure 10).

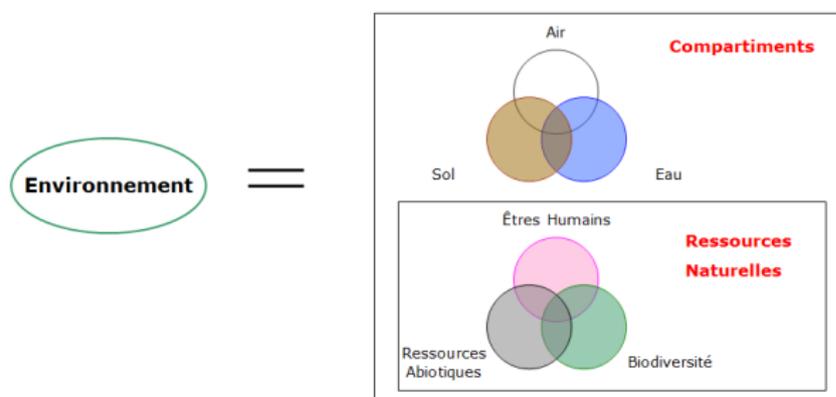


Figure 10 : Cibles atteintes par les impacts environnementaux [3]

En appliquant cette méthode à plusieurs solutions, plusieurs procédés, plusieurs variantes, plusieurs sites, il est possible de comparer leurs effets respectifs. Il reste alors à effectuer un choix final, en fonction de l'importance que le décideur accorde à chaque critère (par exemple, est-il plus grave de polluer l'air ou de polluer l'eau ?). Ce choix est de la responsabilité du donneur d'ordres qui a demandé l'étude et non plus de celui qui pratique l'analyse. C'est au décideur d'imaginer et de décrire les scénarios envisagés et à comparer.

2. Historique de l'ACV

C'est dans les années 70 qu'ont été développées les premières études ACV. Elles avaient principalement pour but de minimiser les consommations énergétiques et de limiter l'utilisation des matières premières [19]. Il faut attendre le début des années 90 pour voir apparaître une homogénéisation des techniques utilisées [20]. A la fin de cette décennie, la publication des normes internationales ISO 1404X concernant l'ACV et les différentes étapes de la méthode a permis de rendre les résultats plus robustes et fiables [3] :

Années 1970 : Démarrage

- Impact des facteurs énergétiques sur la production et la distribution de produits industriels

1997 : Publication de la première norme

- **ISO 14040** – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre, établissant les lignes directrices pour la pratique de l'ACV

1998 : Publication de la norme

- **ISO 14041** – Management environnemental – Analyse de cycle de vie – Définition de l'objectif et du champ de l'étude et analyse de l'inventaire

2000 : Publication des normes

- **ISO 14042** – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Evaluation d'impacts du cycle de vie
- **ISO 14043** – Management environnemental – Analyse du cycle de vie - Interprétation du cycle de vie
- **ISO 14047** – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exemples d'application d'ISO 14041

2002 : Publication de la norme

- **ISO 14048** – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Format de documentation de données. Cette norme documente le format de transfert des données.
- Lancement de l'Initiative pour le Cycle de Vie (Life Cycle Initiative) entre la SETAC et le PNUE.

Les organisations impliquées dans le développement des ACV sont :

- Organisation Internationale de Normalisation (ISO)
- Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC)
- Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE)
- Agences liés à l'environnement (US-EPA, ADEME ...)
- Universitaires

2006 : Mise à jour de la norme **ISO 14040** et le regroupement des normes **14041, 14042 et 14043** au sein d'une seule norme **ISO 14040**.

- **ISO 14044** – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices

Dans ce qui suit nous présentons le cadre méthodologique de l'ACV décrit par la norme.

3. Cadre méthodologique de l'ACV

Selon la définition des normes ISO, l'ACV s'effectue en quatre étapes majeures (figure 11) :

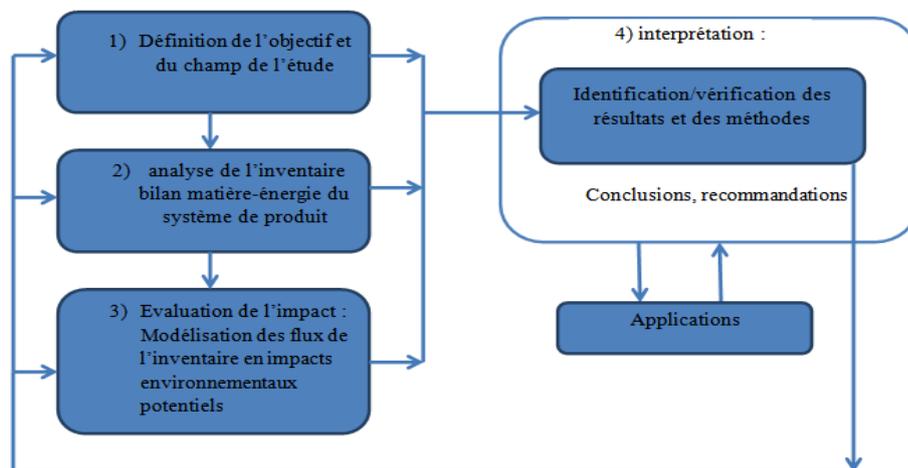


Figure 11 : Cadre méthodologique de l'ACV [4]

3.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

a) Définition des objectifs de l'étude :

Elle doit définir :

- les raisons pour lesquelles l'étude est menée (choix, conception, etc.),
- les applications envisagées (amélioration, aide à la décision, communication, etc.)
- l'audience pour laquelle les résultats sont communiqués (interne, autorités, etc.).

Les quatre objectifs typiques d'une ACV sont les suivants (Voir Annexe 2) :

- Comparaison de différents systèmes de produits concurrents dans le but de déterminer lequel est le plus éco-efficace ;
- Analyse globale du cycle de vie d'un système de produits donné en démontrant qu'il est sans conséquence sur l'environnement par rapport à une référence ;

- Comparaison des étapes du cycle de vie d'un système de produits, des composants ou des processus élémentaires et la détermination des émissions qui contribuent le plus à l'environnement
- Comparaison d'un système de produits et de ses alternatives ou par rapport à un système de référence.

Les différents enjeux de l'ACV sont :

- Identifier les principales sources d'impacts environnementaux
- Eviter les déplacements de pollution liés aux différentes alternatives envisagées
- Fournir des éléments d'aide à la décision :
 - aux politiques industrielles (choix de conception et d'amélioration de produits, ...)
 - aux politiques publiques (choix de filières de valorisation, critères d'éco-labellisation, ...)
 - aux consommateurs

La définition des objectifs conditionne celle du champ de l'étude.

b) **Définition du champ de l'étude :**

Les principaux éléments qui doivent être fixés dans le champ d'étude peuvent être :

x. L'unité fonctionnelle (UF) :

La base (unité de référence) sur laquelle les systèmes assurant les mêmes fonctions et dans des conditions similaires sont étudiés et comparés. L'UF d'une usine doit être construite à partir de l'évaluation des fonctions remplies par les systèmes étudiés. L'UF permet pour chaque système de mesurer une quantité de produit de référence, appelée flux de référence. A partir de ce flux de référence, tous les flux des processus élémentaires de chaque système sont normalisés et ils sont agrégés en des mêmes catégories d'entrants et de sortants du système.

L'unité fonctionnelle d'une usine doit prendre en compte une unité de quantité, une unité de fonction, une unité de qualité de la fonction et une unité de temps [18]. Il convient alors de distinguer entre durée de vie et durée d'utilisation effective. Par exemple, pour une peinture, l'unité fonctionnelle pourra être la quantité de peinture nécessaire pour couvrir un mètre carré de mur avec un degré d'opacité défini et pour une durée de dix ans. L'unité fonctionnelle peut représenter un flux fonctionnel entrant (usine de traitement) ou sortant (usine de production) de l'usine étudiée (figure 12). Par exemple, une station d'épuration (STEP) a comme flux fonctionnel le traitement des eaux usées et comme UF le traitement de $X \text{ m}^3$ d'eaux usées par jour et par équivalent habitant.

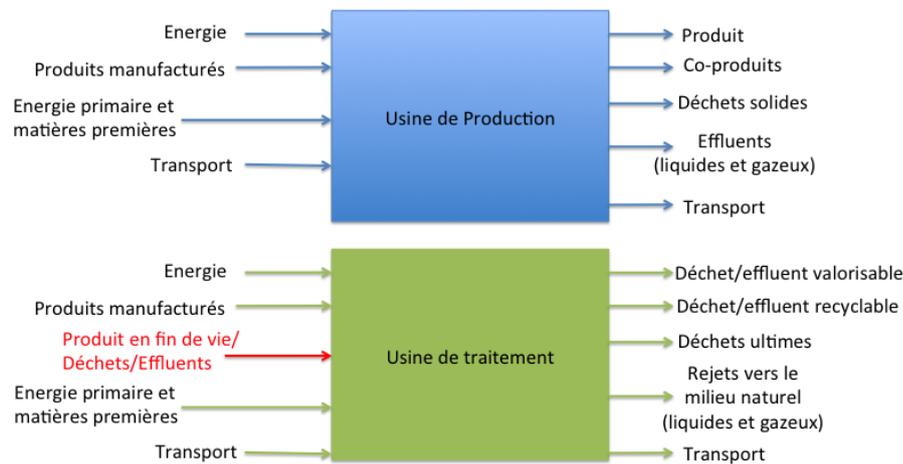


Figure 12 : Fonction d'une usine de production et de traitement

xi. Les frontières de chaque système étudié :

Il s'agit d'identifier les procédés unitaires qui doivent être inclus dans l'étude du système et d'étudier leurs typologies. La norme préconise que le système soit modélisé de telle sorte que tous les entrants et sortants de ses frontières soient des flux élémentaires [21]. La norme propose la construction d'un diagramme dit « arbre des procédés » montrant les procédés unitaires inclus dans l'étude et leurs interconnexions. On doit préciser le début et la fin de chaque procédé unitaire, la nature des transformations et opérations qui se produisent et quelles sont les procédures d'affectation choisies. Il s'agit aussi d'identifier les flux que l'on va suivre jusqu'à l'environnement (extraction ou émission). Toute activité fait plus ou moins appel à d'innombrables éléments de la technosphère. Ainsi, on doit limiter la frontière du système à un niveau raisonnable en fonction des objectifs de l'étude « règles de coupures ». La norme propose des règles de décision pour la sélection des flux et des processus élémentaires significatifs qui sont généralement la masse, l'énergie, la pertinence environnementale (l'importance relative de l'impact environnemental du flux) ou le contexte socio-économique. On peut exclure la quantification des entrants et sortants lorsque les données ne sont pas disponibles ou leurs pertinences environnementales sont négligeables. Une analyse de sensibilité sur le niveau de détail peut être réalisée pour montrer l'influence de l'élargissement (des frontières des systèmes) ou l'omission (de certains entrants ou sortant) sur les résultats de l'étude. Tous les choix et hypothèses d'omission d'une ou plusieurs étapes du cycle de vie ou de certains flux doivent être clairement explicités pour des raisons de transparence de l'étude.

xii. Règles d'affectation :

L'affectation (allocation ou imputation) consiste à attribuer et répartir les charges environnementales (correspondant à tous les flux qui causent des impacts environnementaux) d'un système entre toutes les fonctions assurées (flux de fonction) par ce dernier. Il vaut mieux organiser l'arbre des procédés en modules (transport, production de réactif, production d'énergie, etc.) La

norme met en place une démarche générale pour résoudre les problèmes d'allocation qui consiste par ordre décroissant de préférence :

- Eviter autant que possible les allocations par découpage ou élargissement des frontières du système, appelée aussi causalité naturelle ;
- Lorsque l'allocation ne peut pas être évitée, rechercher des causalités physiques sur la base des propriétés physiques des flux (masse, volume, énergie, exergie, etc.) ;
- En dernier recours, les charges environnementales sont allouées aux flux au prorata de leurs valeurs économiques, appelée causalité économique.

Il existe deux classes de méthodes d'allocation pour les multi-fonctions :

- Co-fonctions simultanées (coproduction, co-traitement, revalorisation/recyclage en boucle fermée) ;
- Co-fonctions successives (revalorisation/recyclage en boucles ouvertes)

Les revalorisations/recyclages en boucles fermées sont co-fonctions simultanées dans des filières internes à un cycle de vie. L'emploi de matières recyclées ou réutilisées remplace une certaine quantité des matières premières vierges. Les revalorisations/recyclages en boucles ouvertes sont des co-fonctions successives dans des filières de revalorisation externe.

xiii. Types des données et leurs collectes :

Les données peuvent être mesurées, estimées, calculées, obtenues par l'avis d'un expert ou par recherche bibliographique ou encore en utilisant des bases de données spécialisées en ACV. Les données peuvent être spécifiques à un site ou plus générales et peuvent être aussi quantitatives ou qualitatives. Toutes les hypothèses concernant le modèle de production d'électricité « mix-énergétique » choisi doivent être précisées.

xiv. Les exigences sur les données de l'inventaire :

La crédibilité des résultats de l'étude dépend des caractéristiques spécifiques quantitatives et qualitatives des données et sur les méthodes utilisées pour leur collecte et intégration. Pour évaluer la qualité de données, la norme recommande d'utiliser des descripteurs temporels, géographiques et technologiques. D'autres descripteurs peuvent être utilisés tels que la précision, la complétude, la représentativité, la consistance et la reproductibilité des données. La méthode de Monté Carlo permet d'obtenir une distribution des résultats d'une étude en fonction des valeurs des paramètres incertains [22], [23].

xv. Limitations de l'étude :

On doit montrer les points fixés dans la définition des objectifs auxquels l'étude a réussi à répondre et les problèmes qui n'ont pas permis de satisfaire les autres besoins de l'étude. Les difficultés rencontrées lors de la mise au point du champ de l'étude (manque qualitatif et quantitatif des données, problèmes d'affectation) sont explicitées.

- xvi. Choix des catégories d'impacts : voir la 3^{ème} étape
- xvii. Choix de la méthodes et modèles d'évaluation de ces impacts : voire la 3^{ème} étape
- xviii. Le type de revue critique :

Elle est appelée aussi « revue par les paires » et elle est obligatoire lors d'une étude comparative diffusée au grand public [18]. C'est une contre-expertise de l'étude réalisée par des experts ACV extérieurs à l'organisme commanditaire et à l'organisme qui a mené l'étude.

Comme l'ACV est une technique itérative, le champ de l'étude peut être modifié suite à l'acquisition d'informations supplémentaires [18](obstacles à l'étude, nouvelles données disponibles, nouveaux acteurs impliqués).

3.2 Analyse de l'inventaire du cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie consiste à répertorier, décrire et quantifier l'ensemble des flux élémentaires entrant et sortant des frontières définies du système. Les étapes opérationnelles à suivre [24] sont :

- La préparation de la collecte des données avec la mise en place d'un format de données,
- La collecte des données proprement dite (mesure, calcul, estimation, bibliographie) ;
- La validation des données ;
- L'établissement du bilan relatif à chaque processus élémentaire sur la base de l'unité de référence et des règles d'imputation ;
- La normalisation et agrégation des bilans de chaque processus élémentaire du système sur un flux de référence suivant les règles d'imputation

Si une donnée manquante ou aberrante, la norme propose de résoudre le problème de trois façons différentes :

- Choisir une donnée acceptable et le dire ;
- Mettre un zéro (si justifié) ;
- Calculer une valeur à partir des données provenant de procédés similaires.

Une fois que les données sont obtenues, une analyse de sensibilité doit être faite pour déterminer s'il est critique ou non d'exclure ou d'inclure une étape du cycle de vie, un processus élémentaire ou un flux. Ainsi, les frontières du système peuvent être révisées en fonction des règles de coupure décrites dans la définition du champ de l'étude.

3.3 Evaluation d'impacts environnementaux

La phase d'évaluation d'impacts consiste à évaluer les résultats de l'inventaire en termes de conséquences sur l'environnement et de les exprimer en impacts environnementaux potentiels (figure 13). L'évaluation d'impacts comprend les étapes suivantes :

- Choix des catégories d'impacts et des indicateurs (modèles) correspondant ainsi que la classification des résultats de l'inventaire dans ces catégories d'impacts ;
 - Caractérisation des impacts potentiels pour chaque catégorie d'impact ;
 - Evaluation globale des impacts par la normalisation et l'agrégation pondérée des indicateurs d'impacts
- « éco-score ».

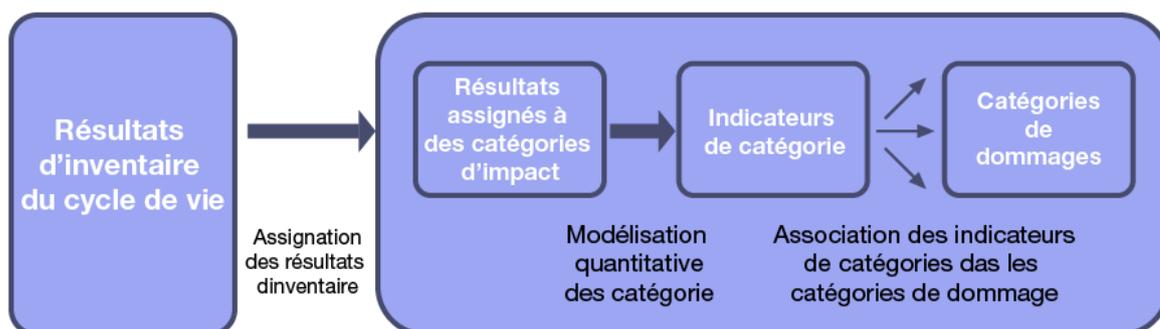


Figure 13 : Evaluation d'impact d'un système [3]

Les méthodes d'évaluation d'impacts sont élaborées par des groupes pluridisciplinaires faisant partie du milieu universitaire ou des bureaux d'études. Chaque méthode d'évaluation d'impacts diffère selon la manière de classification des flux élémentaires, du calcul de l'impact et du niveau d'agrégation. La différence dépend aussi du niveau de la chaîne de cause à effet sur lequel doit porter l'évaluation. Un point de la chaîne de cause à effet correspond à une catégorie d'impact, par exemple l'effet de serre (figure 14).

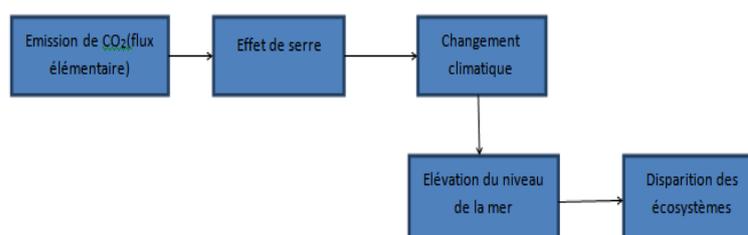


Figure 14 : chaîne d'impact d'un flux élémentaire [4]

Le choix de la méthode se fait par deux types d'approches possibles : celle du point intermédiaire (mid-point) qui modélise l'effet et celle du point final (end-point) qui modélise le dommage. La caractérisation d'impacts consiste à quantifier la contribution potentielle de chaque flux élémentaire d'un système aux classes d'impacts retenues et dans lesquelles le flux a été assigné.

Les résultats d'une ACV sont ainsi exprimés sous forme d'une série de résultats qui présente à la fois des impacts potentiels du type « X kg de d'équivalents CO2 pour l'effet de serre et des flux physiques « Z MJ d'énergies non renouvelables », « W kg de déchets banals », ...etc.

La présentation des résultats s'effectue sous forme plus ou moins agrégée, par indicateurs d'impacts (effet de serre, eutrophisation, ...) et par étapes du cycle de vie (figure 15).

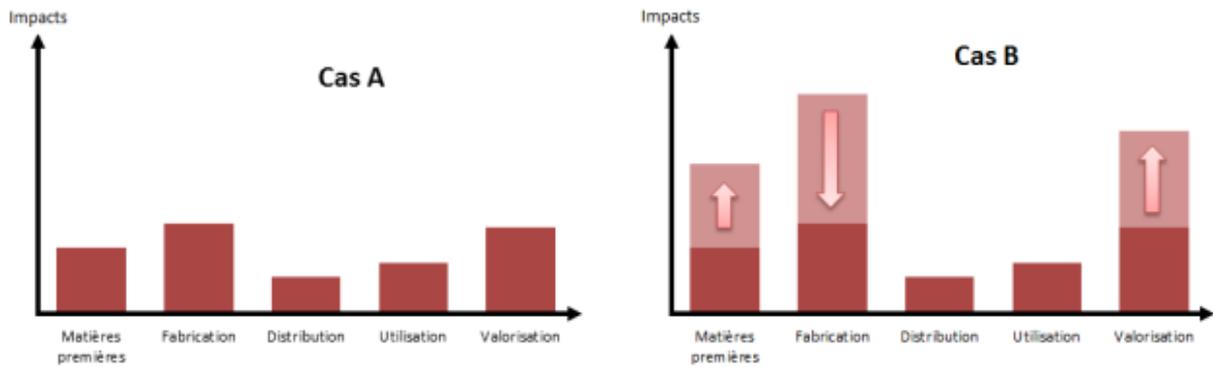


Figure 15: Evaluation d'impacts environnementaux de deux scénarii A et B [3]

L'enjeu majeur de l'utilisation de l'ACV est d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux et d'éviter ou, le cas échéant, d'arbitrer les déplacements de pollutions liés aux différentes alternatives envisagées. Le schéma ci-dessous illustre cette notion de transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre. En diminuant un impact environnemental au niveau des matières premières, on l'augmente au niveau des étapes de la fabrication et de l'utilisation (figure 16).

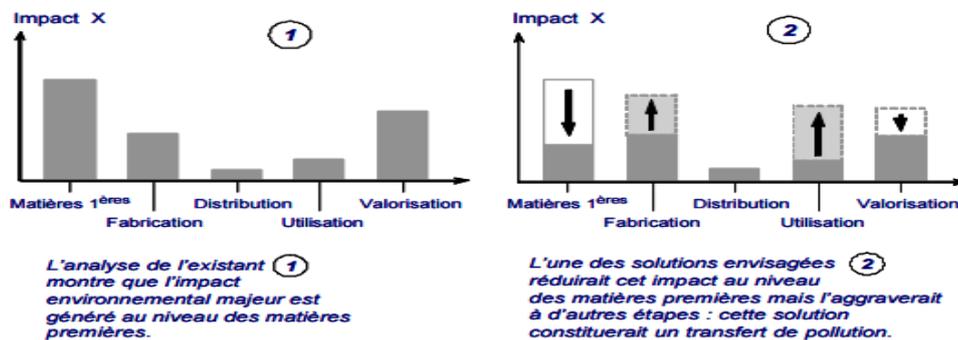


Figure 16 : Analyse par contribution des différents processus d'un système pour l'impact X

Les transferts de pollution peuvent également concerner des impacts différents : par exemple, un changement de matériau permettrait une diminution de la consommation des ressources non renouvelables lors de la production mais qui causerait une augmentation de la pollution des eaux lors de l'élimination des produits.

L'objectif de l'ACV est de présenter une vision globale des impacts générés par un système fournissant ainsi des éléments d'aide à la décision aux politiques industrielles ou publiques. Certaines méthodes agrègent les catégories d'impacts dans des familles de dommage (Tableau 2). Les familles de dommage sont ensuite agrégées pour donner un résultat unique « un score ».

3.4 Interprétation et recommandation

L'interprétation est itérative et interagit avec les trois étapes de l'ACV. Elle remplit un rôle d'aide à la décision. Cette étape identifie, qualifie, retient et évalue l'information d'après les hypothèses

émises, les résultats de l'analyse de l'inventaire et l'évaluation des impacts, en accord avec la définition des objectifs. La norme définit trois étapes pour l'interprétation :

- Identification des points significatifs des résultats de l'inventaire et des méthodes utilisées, des choix méthodologiques, des choix des valeurs utilisées, du rôle et de la responsabilité des différentes parties intéressées.
- Evaluation des informations de l'ACV par des contrôles de complétude, de sensibilité, d'incertitude et de cohérence.
- Conclusions et recommandations émanant de l'étude.

L'interprétation devra vérifier aussi certaines adéquations (Chevalier, 1999) :

- La définition de l'unité fonctionnelle et des frontières du cycle de vie ;
- La définition des limitations identifiées par des analyses de sensibilité.

Dans la Figure 17 suivant, on présente un résumé sur les quatre étapes de l'ACV.

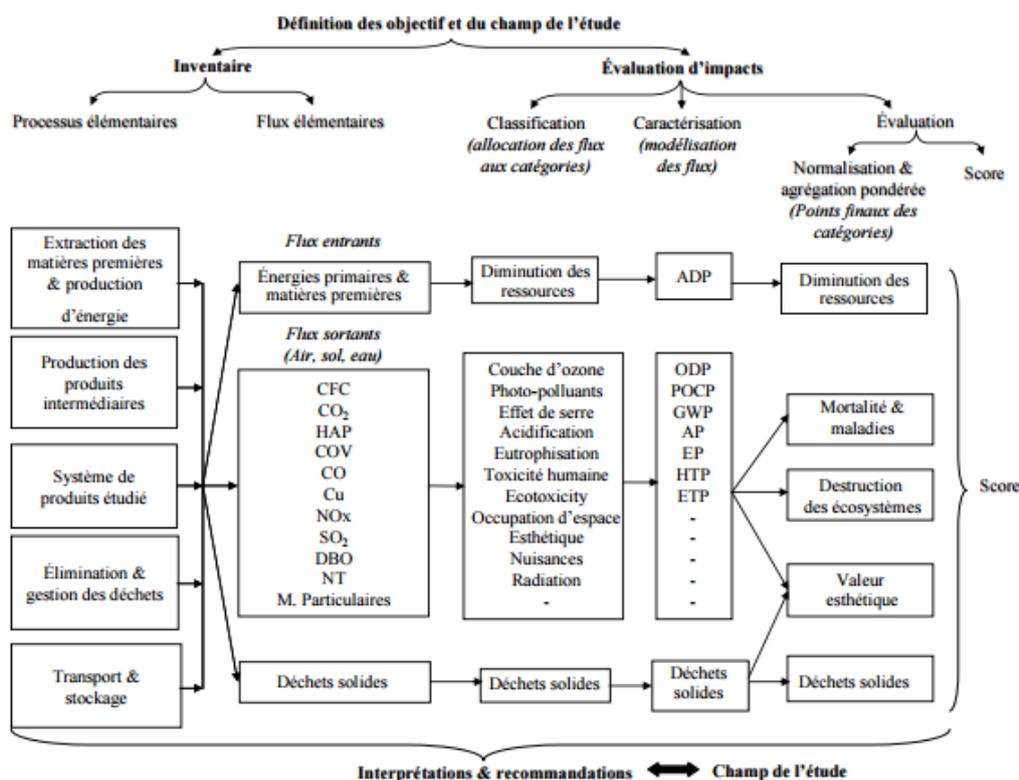


Figure 17 : Etapes de l'évaluation des impacts [4]

4. Application de l'ACV à l'industrie de gestion des déchets

Le système de gestion des déchets d'une agglomération contient :

- Déchets solides urbains
- Déchets industriels solides
- Eaux usées urbains et pluviales
- Eaux usées industrielles

Dans de telles applications, les ACV n'intègrent pas les émissions et consommations associées aux étapes précédentes du Cycle de Vie, avant que le produit ne devienne un déchet. En revanche, sont intégrées les différentes étapes de la gestion des déchets, y compris les étapes de valorisation et de recyclage (figure 18). Le déchet peut faire l'objet de différents traitements : recyclage, valorisation énergétique, valorisation de matière. La comparaison entre ces différents scénarii sera rendue possible en soumettant chacun d'entre eux à un bilan quantitatif. De même, il sera possible de comparer différentes combinaisons, plus ou moins complexes, entre ces différentes solutions. Il est possible d'étudier les questions de localisation sur la pollution émise par les transports.

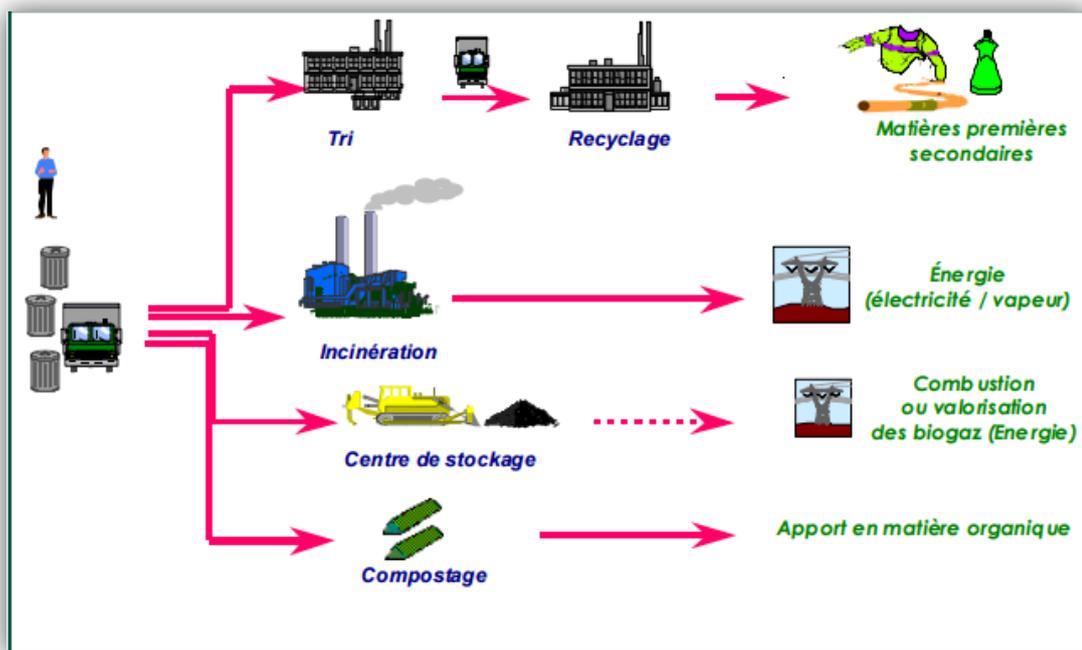


Figure 18 : Différentes étapes du service de gestion des déchets [3]

Dans ce travail, nous nous intéressons à une usine de traitement des eaux usées comme étude de cas.

IV. Etude de Cas – Analyse de Cycle de Vie de la STEP de Guelma

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

La STEP de Guelma se situe à un km au nord de la ville, sur le flanc droit de la vallée développée par oued SEYBOUSSE, et sans habitations existantes à proximité. Elle est implantée sur un terrain agricole de 7.8 Hectares. La STEP est fonctionnelle depuis 2008 et exploitée par l'ONA où le réseau d'assainissement est du type unitaire englobant les égouts, les rejets industriels et résiduaux. C'est une station classique à boues activées à moyennes charges où elle est dimensionnée pour traiter la pollution de 200 000 E.H. Actuellement, elle traite 119 563 équivalents habitant [25].

1.1 Définition des objectifs

- Comparaison entre la phase de construction et d'exploitation de l'usine.
- Analyser plusieurs solutions de valorisation des boues : épandage et co-incinération avec les déchets urbains.
- Analyser une symbiose industrielle : recyclage des boues en cimenterie et utilisation des eaux traitées en irrigation
- Analyser l'impact du transport des boues dans la phase d'exploitation

Les différentes solutions comparées sont regroupées dans le tableau suivant :

Symbole	A	B	C	D
Type de scénario	Scénario de référence	Scénario d'épandage des boues de la STEP de Guelma dans la ville de Bordj Bou Arreridj	Scénario d'épandage des boues de la STEP dans la ville de Guelma	Scénario de co-incinération des boues avec les déchets urbains
Frontières du système	- Mise en décharge des boues - Importation des boues de l'Italie pour l'agriculture à la ville de Guelma	- Transport des boues - Impact des boues sur le sol agricole - Impact évité par la substitution des engrais synthétique	- Impact des boues sur le sol agricole - Impact évité par la substitution des engrais synthétique	- Impact évité par la substitution de l'énergie primaire

Tableau 3 : Scénarii comparées sous l'étude

1.2 Définition du champ de l'étude

1.2.1 Frontière du système sous l'étude

La phase de démantèlement est exclue de l'étude. La phase d'exploitation tient compte de la production d'énergie, des matériaux de construction et des réactifs, les transports divers, l'élimination finale des boues. Chaque scénario sera découpé en plusieurs modules :

- le fonctionnement de l'usine,
- fabrication des matériaux de construction (ciment, acier) dans la phase de construction
- la production d'électricité
- la fabrication des membranes
- la fabrication des réactifs (fertilisants synthétiques)

- le scénario d'élimination finale (CET, incinération, épandage, cimenterie, sidérurgie).

Les frontières des systèmes choisies sont présentées dans la figure 19.

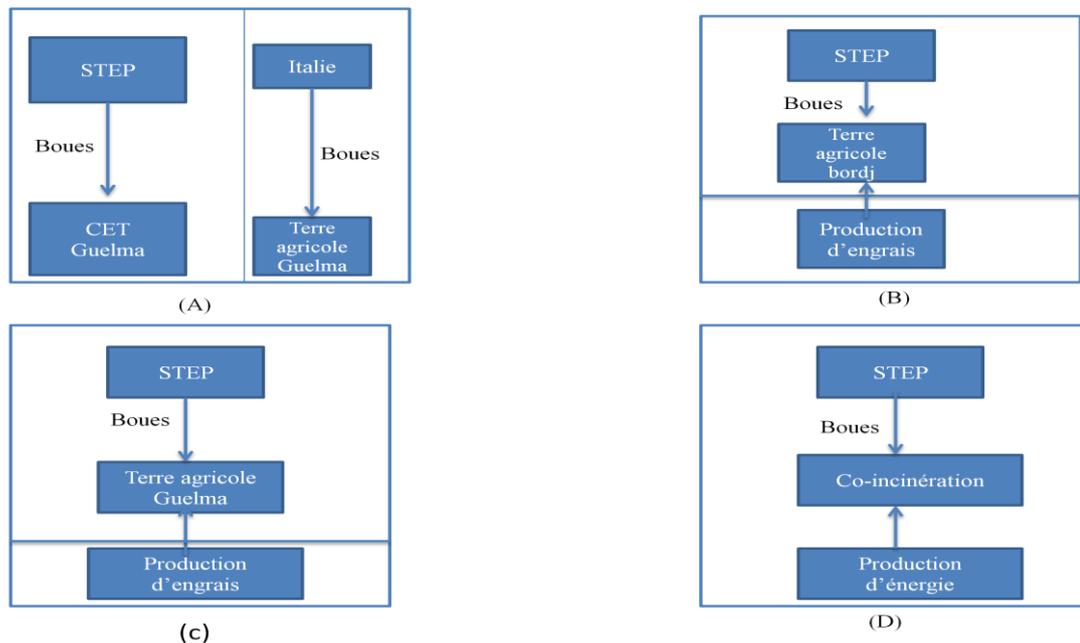


Figure 19 : Frontières des systèmes choisies pour l'étude

1.2.2 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle choisit est le traitement d'un débit d'eaux usées par équivalent habitant et par an. Le flux de référence calculé est le traitement d'un volume de 58.4 m³ d'eaux usées par Equivalent Habitant par an.

1.2.3 Description de l'usine d'épuration

- **Filière traitement de l'eau**

L'opération se déroule en trois traitements essentiels : le prétraitement, le traitement primaire et le traitement secondaire (figure 20).

1/ Prétraitement :

a) le dégrillage

Il est constitué d'une installation de deux dégrilleurs à nettoyage automatique par râpeaux. Il a pour but d'éliminer les éléments solides ou particulaires les plus grossiers. Les rejets de dégrillage seront évacués par un tapis transporteur vers la benne de décharge.

b) Dessablage – Déshuilage

Ce traitement s'effectue dans deux ouvrages accolés longitudinalement. Le Dessablage a pour but de faire décanter les éléments plus fins et le Déshuilage-dégraissage pour éliminer les huiles et les graisses. Les sables seront extraits de l'ouvrage de prétraitement, séparés de leur eau par un classificateur, puis stockés dans une benne. Les graisses et huiles sont stockés dans une fosse à graisses avant enlèvement.

2/ Traitement primaire (décantation primaire)

La décantation primaire classique se fait dans deux ouvrages de forme cylindro-conique où est séparé le liquide des solides déposés, appelés « boues primaires ». Ces dernières sont récupérées au moyen d'un système de raclage.

3/ Traitement secondaire :

Elle consiste à mettre en contact de l'eau usée une biomasse épuratrice. Dans le cas des eaux usées urbaines, on favorise le développement de bactéries aérobies, c'est-à-dire, qui utilisent l'oxygène pour se développer. Le traitement secondaire comporte trois étapes principales :

a) Un traitement biologique :

L'aération s'effectue dans deux bassins longitudinaux fonctionnant en parallèle où la pollution carbonée est éliminée. Le carbone organique se retrouve sous forme de CO₂ biogène et de biomasse. Etant donné que la croissance bactérienne nécessite la présence des éléments nutritifs en particuliers l'azote et le phosphore contenus dans les effluents, sont également éliminés. L'élimination des nitrates est assurée par l'existence de zones anoxies.

b) Une décantation secondaire (clarification)

A la sortie des bassins d'aération, la liqueur biologique sera soumise à une clarification dans deux décanteur de façon à séparer les bous activées de l'eau épurée. Une partie des boues est recyclée vers le bassin d'aération, l'autre partie, appelée boues secondaires, est envoyée vers la filière de traitement des boues.

c) Traitement tertiaire par chloration

La chloration est un **moyen simple et efficace pour désinfecter l'eau** en vue de la rendre potable en introduisant des produits chlorés (patis de chlore ou eau de javel).

• Filière traitement des boues:

Le traitement des boues consiste à réduire la quantité d'eau des boues et réduire leur caractère fermentescible à fin de rendre leur destination finale fiable et sans nuisance. Elle est constituée de trois étapes : l'épaississement gravitaire, la stabilisation biologique et le séchage naturel.

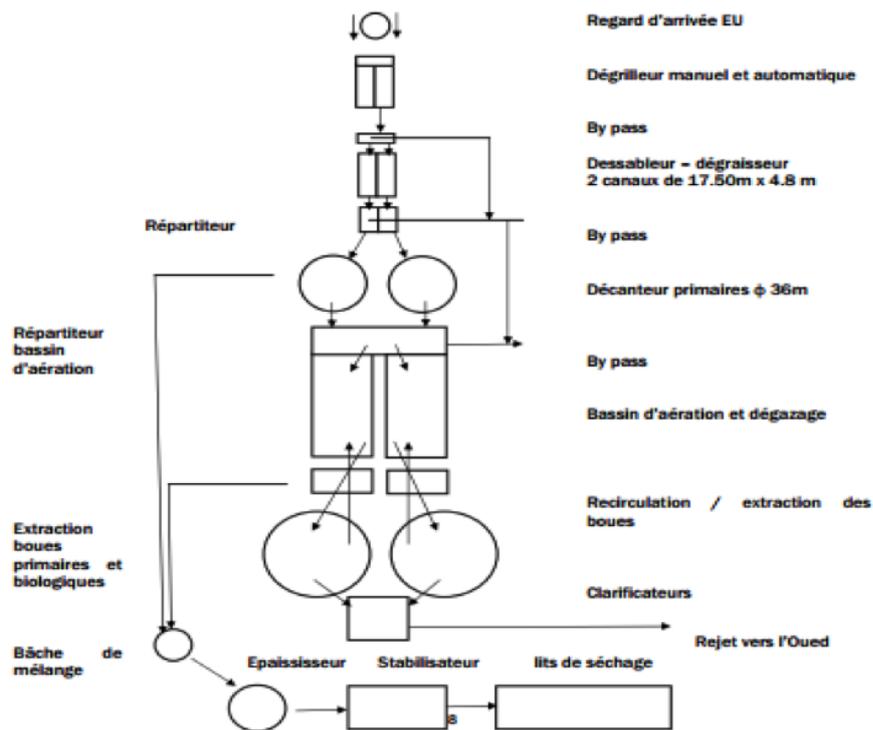


Figure 20 : Schéma descriptif de l'Usine étudié

1.2.4 Logiciel et méthode

Dans cette étude, nous avons utilisé une démo du logiciel SimaPro 8 (développé par Pré Consultants, Pays Bas) pour modéliser les filières, recenser les flux, établir les inventaires et calculer les impacts à partir des différentes méthodes de calcul d'impact.

Le logiciel peut être utilisé pour une grande variété d'applications [25], tels que les rapports sur la durabilité, le carbone et l'eau, conception de produits, d'encombrement, la génération de déclarations environnementales de produit et de déterminer des indicateurs de rendement clés.

La version 8.0 comprend la nouvelle version de la base de données ACV Ecoinvent V3. Cette base de données comprend déjà un grand nombre d'ACV déjà réalisées, et sa nouvelle version possède plus de données dans les domaines du recyclage, de la production d'électricité, de molécules chimiques.

De plus, cette nouvelle version permet de quantifier les impacts liés à la consommation d'eau au cours des différents processus amenés à être décrits lors d'une ACV. Ainsi, les processus décrits par Ecoinvent servent de base pour décrire les caractéristiques des différentes opérations culturelles et industrielles utilisées pour notre ACV. Pour la phase d'évaluation, les méthodes de calcul d'impact utilisées dans cette étude sont :

- **CML** (version 2000),
- **IMPACT 2002+**,

Utiliser plusieurs méthodes pour évaluer chacun des impacts et voir s'il y a convergence ou non des

résultats permet de vérifier la validité des résultats. La comparaison de ces méthodes permettra également d'analyser l'influence de celles-ci sur les conclusions de l'étude.

1.2.5 Impacts évalués

Dans cette étude nous avons choisi d'évaluer les scénarii sur cinq impacts :

- **l'épuisement des ressources non renouvelables.**
- **l'effet de serre,**
- **l'acidification,**
- **l'eutrophisation,**
- **la pollution photochimique,**
- **la toxicité,**
- **l'écotoxicité,**

1.2.6 Hypothèses et qualité des données

Les données de la STEP sont mesurées et calculées où elles sont tirées de l'évaluation statistique basée sur les relevés mensuels et annuels de l'exploitant pour les années 2013 à 2015. Une partie des données est estimée de la littérature et une partie est exclue de l'étude. Cette étude doit être accompagnée par des analyses de sensibilités et d'incertitudes. Ainsi, cette étude servira de base et les données devront être améliorées dans les prochains travaux. La version démo du logiciel ne nous permette pas d'utiliser certaines bases de données.

Le mode de production électrique sélectionné est le modèle du mix-énergétique algérien. Le parc de production national est constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE), et des sociétés en partenariat [27], à savoir :

- Kahrama Arzew mise en service fin 2005 ;
- Shariket Kahraba Skikda « SKS » mise en service en 2006 ;
- Shariket Kahraba Berrouaghia « SKB » (Médéa) mise en service en 2007;
- Shariket Kahraba Hadjret Ennouss « SKH » mise en service en 2009.

Les 11 389 MW de capacité installée atteinte fin 2011, sont répartis comme suit :

Producteurs	Production MW	Taux %
SPE	8503,8	74,7%
Kahrama	345,0	3%
SKS Skikda	825,0	7,2%
SKB Berrouaghia	489,0	4,3%
SKH Hadjret Ennouss	1227,0	10,8%
Total	11 389,8	100%

Tableau 4 : source chiffres clés de Sonelgaz pour l'année 2011

A noter que de 2001 à 2011, la capacité de production d'électricité est passée de **5 600 MW** à **11 389 MW**, soit un taux d'évolution de 51% en dix ans. La production national en 2011 a atteint 48 871,2 GWh , elle est réparti par type d'équipement comme suit :

Type d'équipement	Production GWh	Taux %
Turbine vapeur	9 653,7	19,8
Cycle combiné	15 701,3	32,1
Turbine gaz	22055,3	45,1
Hydraulique	378,3	0,8
Diesel	463,9	0,9
Centrale Hybride	618,7	1,3
Total	48 871,2	100

Tableau 5: source chiffres clés électricité et gaz pour l'année 2011

Type d'équipement	Taux %
Gaz naturel	97
Hydraulique	0,8
Diesel	0,9
Centrale Hybride	1,3
Total	100

Tableau 6 : mix- énergétique algérien publié en l'année 2011

1.2.7 Règles d'affectation

Pour l'affectation nous choisissons la causalité physique sur la basse massique, volumique et l'énergie. Pour les opérations de valorisation et recyclage, nous utilisons le principe de la charge évitée pour quantifier l'effet de substitution.

2. Analyse de l'inventaire

2.1 Phase de construction

La quantité de béton de l'ensemble des ouvrages, excepté le prétraitement, a été estimée d'après les informations obtenues auprès de l'exploitant. Le volume de béton utilisé est de 13 000 m³, soit 32500 tonnes. La quantité d'acier du ferrailage du génie civil, des appareils et des canalisations est estimée à environ 1000 tonnes (Renou, 2006). Etant donné que la durée de vie de la station est estimée à 25 ans, les flux du béton et de l'acier, ramené à l'unité fonctionnelle sont respectivement, 1300 t/an et 40 t/an.

2.2 Phase d'exploitation

Les valeurs considérées sont les moyennes des paramètres sur la période 2013 à 2015, calculées à partir des données fournies par l'exploitant. Les paramètres de l'eau à l'entrée de la STEP sont les suivants :

Paramètres	MES	DCO	DBO ₅	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NO ₂	PO ₄ -P
Concentration (mg/L)	298	401	206	27	1.22	2	17
Flux (kg/an)	2 056 415	2 773 236	1 421 071	187 125	8 397	14 431	116 242

Tableau 7 : Paramètres de l'eau à l'entrée de la STEP

Les concentrations et les charges des phosphates sont au-dessus de l'ordre de grandeur d'un pays développé. Les valeurs mesurées pour une station relativement identique traitant 140 000 habitant sont de l'ordre de 7 mg/L et 61 009 kg/an [28]. Les paramètres des eaux traitées rejetées dans l'Oued Seybousse sont donnés dans le tableau suivant :

Paramètres	MES	DCO	DBO ₅	N-NH ₄	N-NO ₃	N-NO ₂	PO ₄ -P
Concentration (mg/L)	9	37	15	3.3	3.2	1	8.2
Flux (kg/an)	49 616	203 430	81 386	18 046	17 660	5 407	44 821

Tableau 8 : Paramètres de l'eau à la sortie de la STEP

La norme algérienne du décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels est :

Paramètres	MES	DCO	DBO ₅	NT	PT	Pb	Fe	Hg	Cu	Zn	Furfural	hydrocarbures
Concentration (mg/L)	35	120	30	30	10	0.5	3	0.01	0.5	3	50	10

Tableau 9 : Valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels

• Module Transports

L'impact environnemental d'un véhicule dépend essentiellement des émissions de la combustion de carburant. Trois paramètres conditionnent cet impact :

- le type de véhicule,
- la distance parcourue,
- la quantité de produit transporté.

Pour le type de véhicule, Simapro dispose d'une base de données adaptée aux différentes catégories de véhicules. Ces bases de données dépendent d'un seul facteur : le nombre de tonne.kilomètre (t.km), qui est le produit des deux autres paramètres.

Comme nous ne disposons pas de données relatives aux quantités de boues importées de l'Italie, nous supposons que c'est la même quantité produite par la STEP de Guelma et ayant les mêmes caractéristiques. La STEP de Guelma produit 1984 tonnes de boues d'une siccité de 45% par an. Après séchage à l'air libre, la siccité des boues atteint environ 100%. Ainsi, la quantité des boues est estimée à 892.9 tonne de MS par an. La quantité moyenne des déchets solides générés pendant les 3 années est de 30 m³/an. Comme les déchets sont hétérogènes et nous ne disposons pas d'informations sur le contenu et ainsi les différentes densités, cette donnée sera exclue de l'étude. La quantité moyenne de sable générée est de 324 m³/an. Une partie est utilisée au niveau de la STEP pour les travaux de remplissage des regards pour la protection des câbles électriques et le reste est stocké. Cette donnée est aussi exclue de l'étude. Ainsi, le flux de transport des boues par unité fonctionnelle du scénario « A » est indiqué dans le tableau suivant :

Produit transporté	De	A	Moyen de transport	Distance (km)	Nombre de t.km /an
Boues 1	Italie	Terre agricole Guelma	Bateau	690	797181
Boues 2	STEP	Terre agricole Bordj-Bou Arreridj	Semi-remorques	243	216 978

Tableau 10: Scénario de transport des boues vers les terres arables

La STEP n'utilise aucun produit chimique pour le traitement.

• Module Energie

La valeur moyenne de l'énergie électrique consommée par la station dans les trois années

considérées est 1 203 267 kWh /an.

- **Module Epannage**

Les paramètres moyens dans les boues sur les 3 années sont pris des fiches d'analyse de l'unité de Guelma, donnés en mg/kg de matières sèches.

	2011-2012 (mg/kg MS)	2012-2013 (mg/kg MS)	2014-2015 (mg/kg MS)	Moyenne (mg/kg MS)	Ecart Type	Moyenne (kg/an)
Cd	4,97	7,5	7	7	1,4	6
Cr	18,23	30	45	31	13,42	28
Cu	133,73	102	131	122	17,58	109
Ni	35,36	36	40	37	2,51	33
Zn	650	395	553	533	128,71	476
Cr+Cu+Ni+Zn	837,32	570,5	769	726	138,60	648
Pb	< 20	9	-	9	-	8
Hg	0,001	< 0,05 10 ⁻³	-	0,001	-	0,0009

Tableau 11 : concentrations des ETM dans les boues

Les paramètres agronomiques des boues épandues sont estimés [28] de la littérature car on n'a pas pu avoir des données réelles.

	Mat.Org.	C Org.	NTK	N-NH ₄ ⁺	CaO	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O
Concentration (Kg/ t boue)	125	70	11	0.4	78.5	2.6	10.1	1.9
Flux total (t/an)	111,6	62,5	9.8	0.36	70	2,3	0,9	1,7

Tableau 12 : paramètres agronomiques dans les boues

L'apport nutritif des boues est calculé en fonction du rendement d'accumulation des plantes en comparaison avec les engrais synthétiques. Nous n'avons pas pu avoir des données représentatives auprès des agriculteurs. Ainsi, nous l'avons estimé à 61% pour l'azote et 70% pour le phosphore [29]. Sur cette base, nous calculons la quantité des engrais synthétiques évités, respectivement, 0.22 tonne d'engrais azotés et 0.63 tonne d'engrais phosphoré évités par an. Nous ne tenons pas compte des flux correspondant à l'utilisation des tracteurs. Il n'existe pas encore en Algérie des normes concernant les limites de concentrations en ETM pour l'épandage des boues.

V. Analyse d'impacts environnementaux de la STEP de Guelma

1. Analyse d'impacts environnementaux

1.1 Comparaison scénario de référence A et le scénario B

L'histogramme donnant la comparaison des impacts potentiels suivant la méthode CML des deux scénarii est montrée dans la Figure 20.

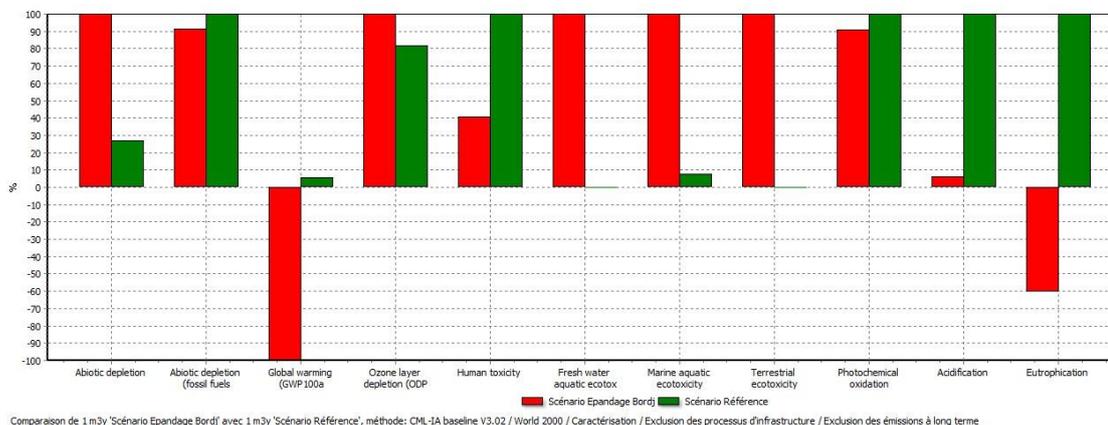


Figure 21 : Comparaison des impacts des scénarii A et B

Impact épuisement des ressources non renouvelables

Le scénario de référence (A) surclasse le scénario d'épandage (B) pour l'impact de l'épuisement des ressources minières tandis qu'il est relativement faible pour l'épuisement des ressources fossiles où la consommation d'électricité et le transport des boues ont les plus importants impacts.

Impact Effet de serre

Le scénario B surclasse le scénario A à cause des impacts évités par la substitution des engrais synthétiques lors de l'épandage agricole. Cependant, le transport des boues reste le maillon faible de toute la chaîne des deux scénarii.

Impact des oxydants photochimiques (smog d'été)

Le scénario B est relativement meilleur que le scénario A où cet impact est causé majoritairement par la consommation d'électricité à cause des émissions du monoxyde de carbone.

Impact d'acidification

Le scénario B surclasse de loin le scénario A à cause de l'impact évité par la substitution des engrais synthétiques (figure 21). Néanmoins, la consommation d'électricité est le module qui cause le plus grand impact dans les deux scénarii à cause des émissions des oxydes d'azote (figure 22).

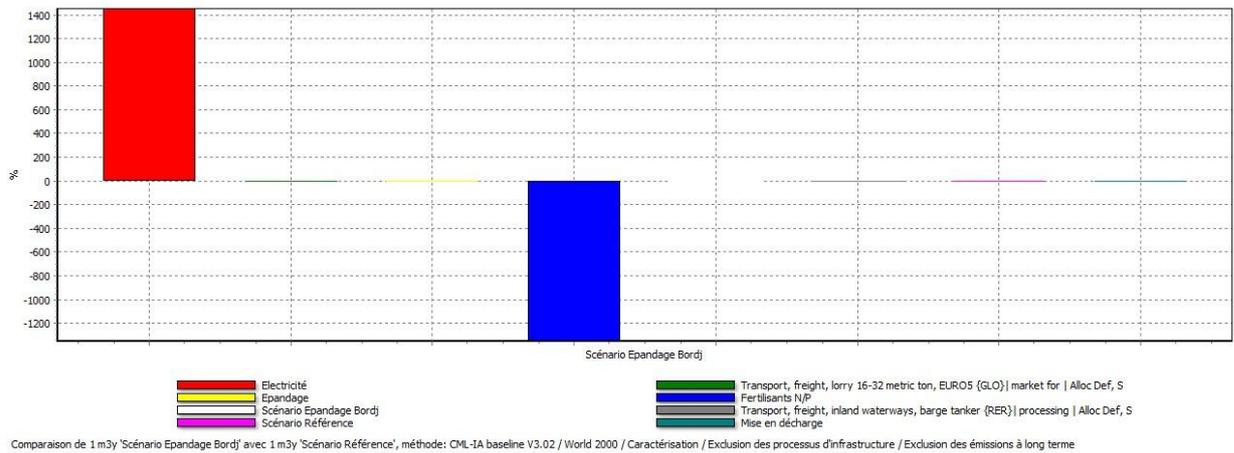


Figure 22 : Contribution des modules du scénario B dans l'impact d'acidification

Impact d'eutrophisation

Le scénario B surclasse le scénario A à cause des impacts évités par la substitution des engrais synthétiques lors de l'épandage agricole. L'électricité et les rejets traités directement versés dans l'oued de Seybousse sont les causes de cet impact dans les deux scénarii. En effet, l'impact total de l'eutrophisation du scénario B est négatif (figure 21) mais il ne supprime les impacts directs causés par l'électricité et les rejets traités (figure 23).

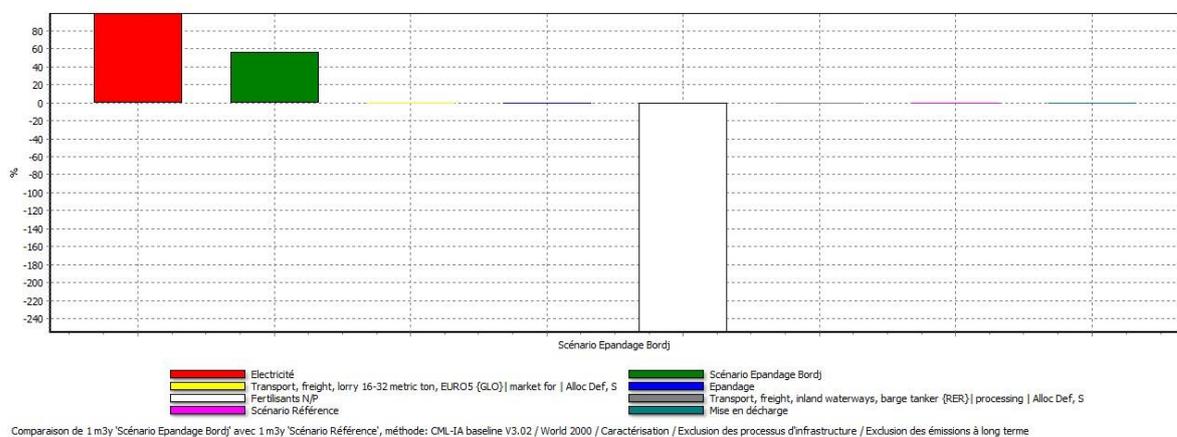


Figure 23 : Contribution des modules du scénario B dans l'impact d'eutrophisation

Les oxydes d'azote générés par la production de l'électricité et le phosphate des rejets directs de la STEP sont les substances qui contribuent le plus dans cet impact (figure 24). La concentration des phosphates émis est largement supérieure des concentrations tolérées par les normes des pays européens. Ceci nous l'expliquons par le lessivages des terres agricoles est l'utilisation abusives des détergents qui contiennent une quantité importante de phosphore.

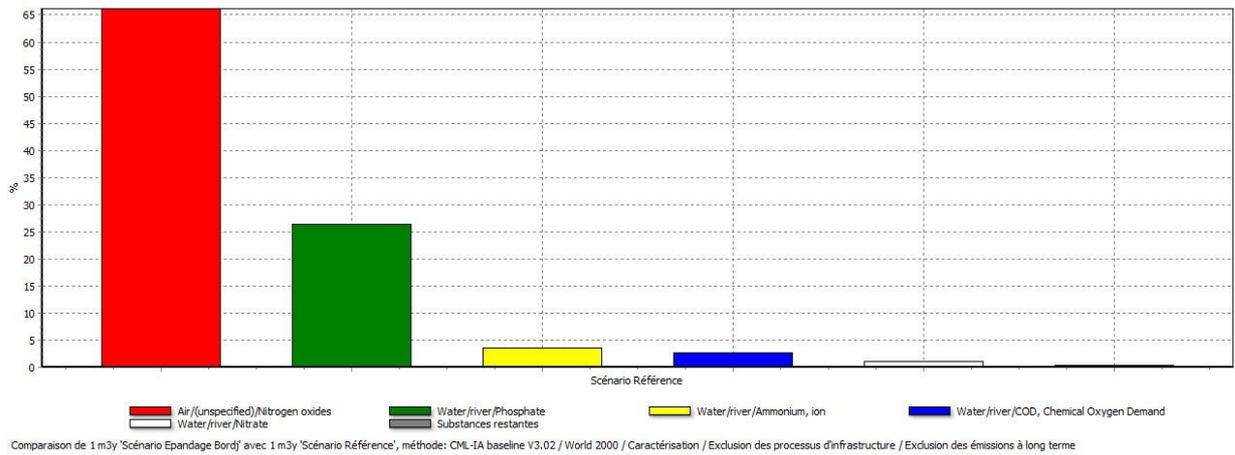


Figure 24 : Contribution des substances dans l'impact d'eutrophisation du scénario B

Impact de toxicité humaine

Le scénario B surclasse le scénario A à cause des impacts évités par la substitution des engrais synthétiques. L'électricité reste le problème majeur et contribue le plus dans cet impact pour les deux scénarii à cause des émissions des oxydes d'azote dans le processus de production.

Impact d'écotoxicité

Pour les trois impacts d'écotoxicité des eaux douces, marines et terrestre, la solution B est de loin celle qui a les plus grands impacts. Dans le scénario A, le transport des boues par voie marine a la part du lion dans les trois impacts. Dans le scénario B, le module d'épandage est celui qui contribue le plus à cause des éléments traces métalliques contenues dans les boues, particulièrement, le cuivre, le nickel, le zinc, le cadmium et le plomb (figure 25 et 26).

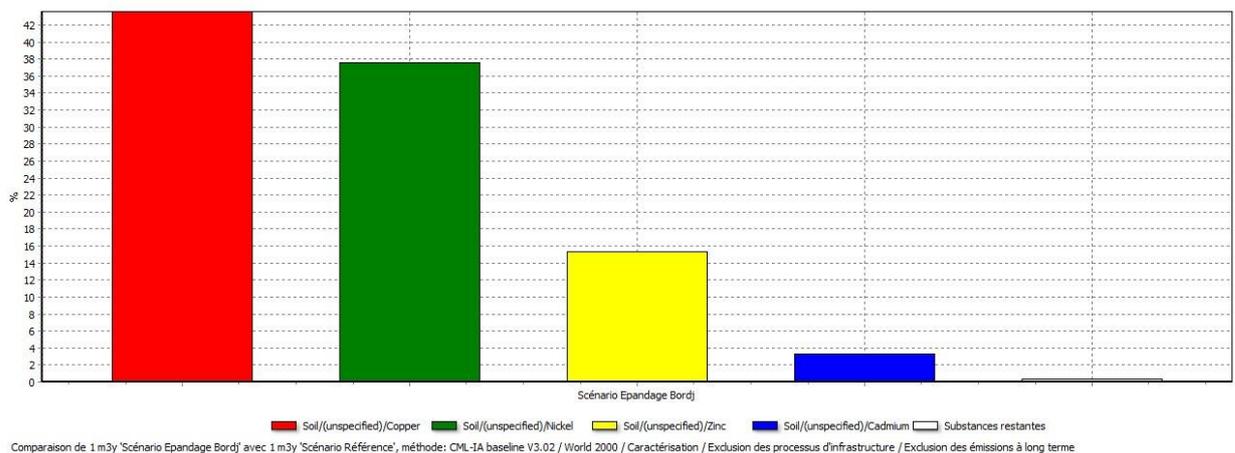


Figure 25 : Contribution des substances dans l'impact d'écotoxicité d'eaux douces du scénario B

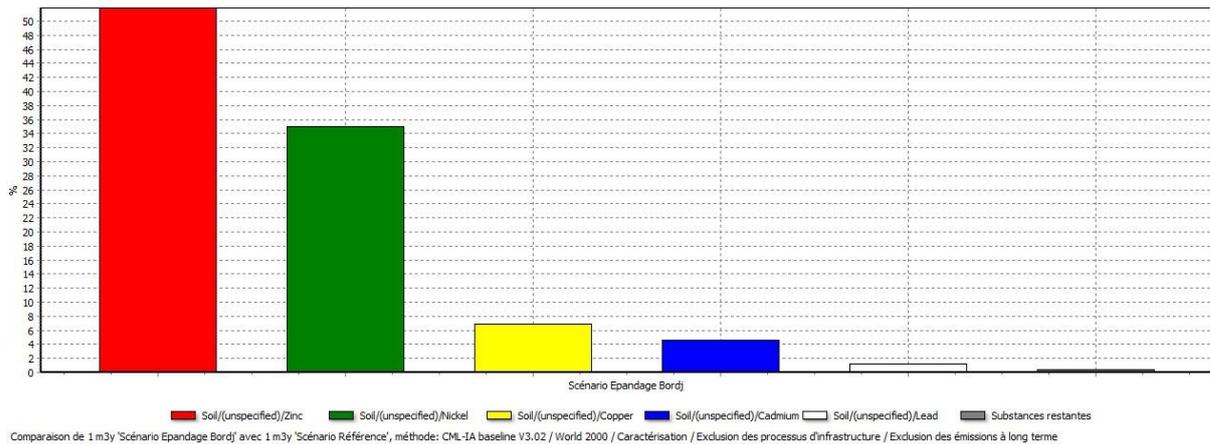


Figure 26 : Contribution des substances dans l'impact d'écotoxicité terrestre du scénario B

Le choix de la solution la plus environnementale est difficile à cause d'aspect multicritère des résultats obtenus par la méthode CML. Le choix basé sur un ou deux impacts est contraignant par rapport aux autres critères d'impacts qui peuvent être aussi important. Le décideur doit faire face à cette difficulté en répertoriant ses objectifs mais tout en respectant la réglementation. Il existe d'autres méthodes offrant la possibilité d'agréger les critères d'impacts en un nombre réduit et l'obtention d'un simple score. Nous effectuons une analyse de sensibilité avec la méthode IMPACT 2002+ qui offre une agrégation des critères en quatre familles d'impacts et par score (figure 27 et 28).

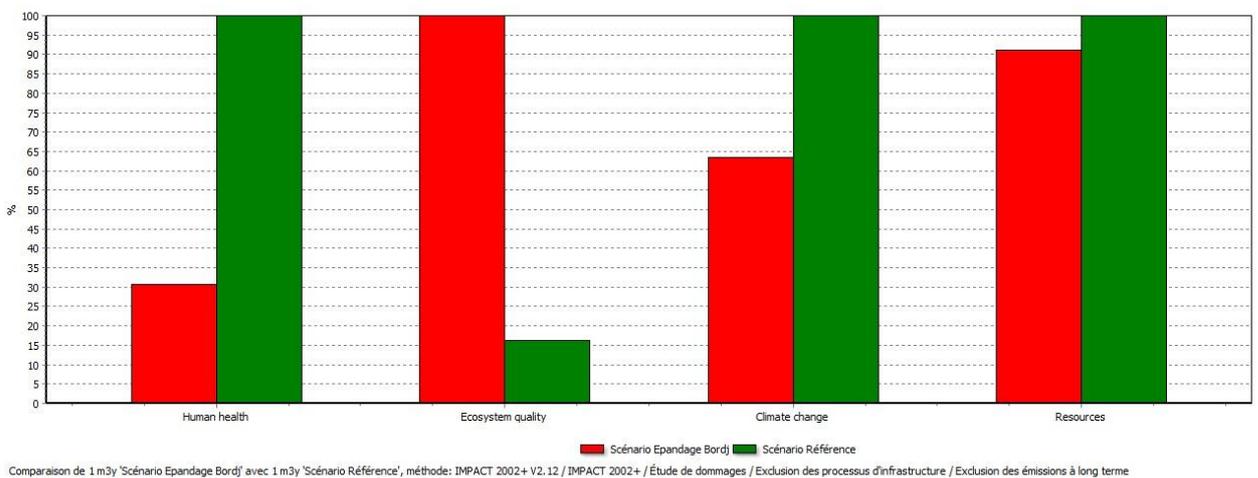


Figure 27 : comparaison des scénarii A et B avec la méthode IMPACT 2002+

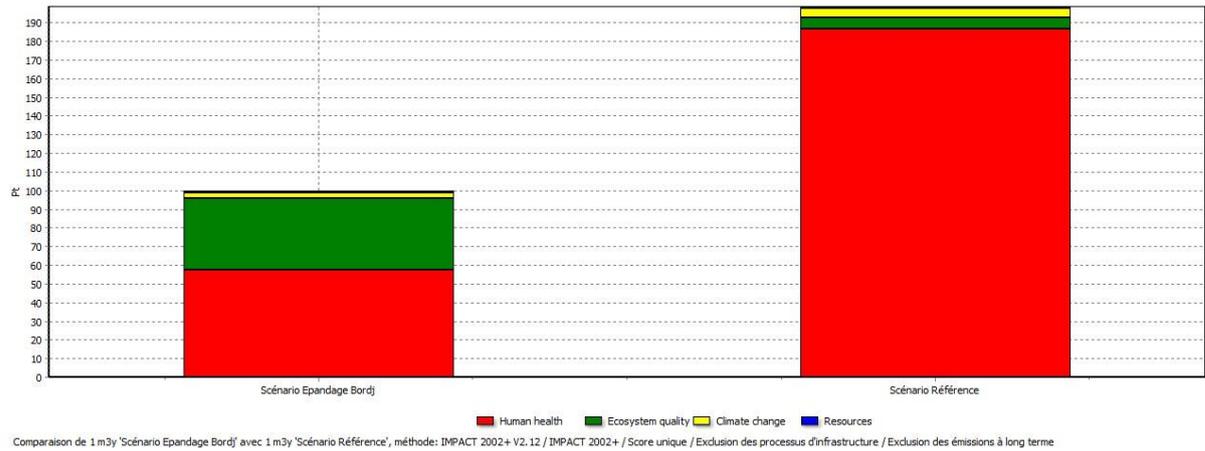


Figure 28 : Comparaison en score unique des scénarii A et B par la méthode IMPACT 2002+
 Avec la méthode IMPACT 2002+, le scénario B est meilleur que le scénario A pour l'impact sur la santé humaine, le changement climatique et l'épuisement des ressources, excepté l'impact sur la qualité de l'écosystème à cause des éléments traces métalliques dans les boues. L'analyse par score unique favorise le choix du scénario B par rapport au scénario A. Ainsi, nous sélectionnons la solution de l'épandage des boues produites par l'usine de Guelma. De plus, l'évaluation d'impact précédente a révélé l'importance du transport des boues dans les impacts d'épuisement des ressources et l'effet de serre. Nous allons comparer le scénario B avec le scénario C « épandage des boues dans la ville de Guelma » ou le transport serait exclu.

1.2 Comparaison scénario B et C

Dans les figures 29 et 30 nous montrons l'évaluation d'impact des deux scénarios avec, respectivement, les méthodes CML et IMPACT 2002+

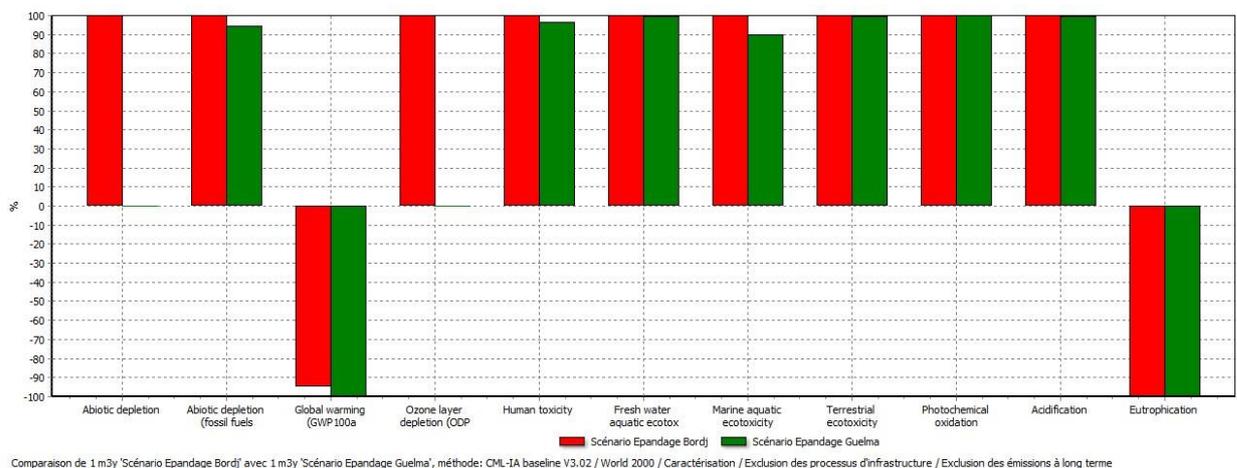


Figure 29 : comparaison des scénarii B et C par la méthode CML

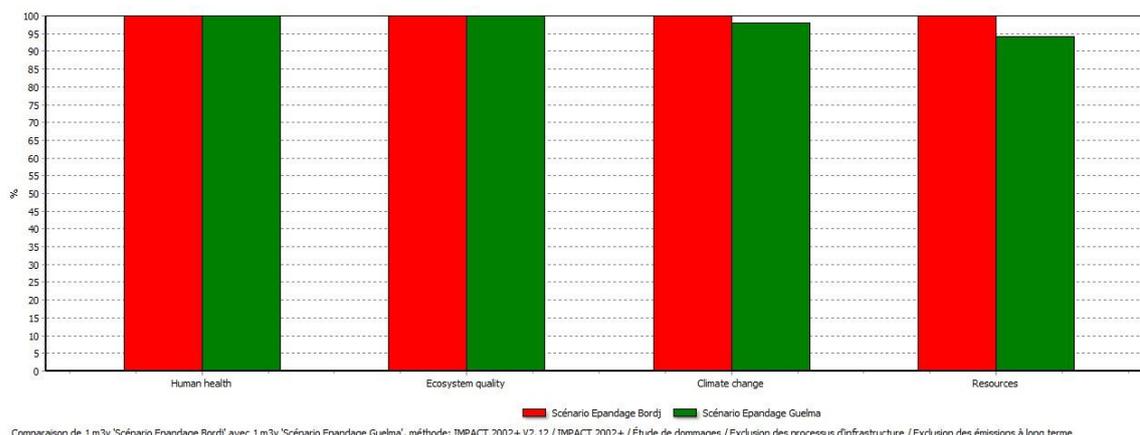


Figure 30 : comparaison des scénarii B et C par la méthode IMPACT 2002 +

Les histogrammes montrent que la suppression de l'importation des boues de l'Italie et l'épandage des boues de l'usine à proximité de la ville réduit de manière conséquente l'impact sur l'épuisement des ressources non renouvelables et relativement l'impact du réchauffement climatique, de la toxicité humaine et l'écotoxicité des eaux marines. Cependant, il n'y a pas de variation notable dans les autres impacts car ils sont causés toujours par la consommation de l'électricité de l'usine et les éléments traces métalliques dans les boues.

Une autre voie de valorisation des boues existe qui est la co-incinération avec les déchets urbains offrant un potentiel de récupération du Pouvoir calorifique des boues qui peut être valoriser en chauffage ou production d'électricité. Dans ce qui suit, nous comparons cette solution avec le scénario C en tenant compte de l'effet de substitution des énergies primaires.

1.3 Comparaison scénario C et D

La comparaison des deux scénarii C et D suivant les méthodes CML et IMPACT 2002+ sont montrées dans les figures 31 et 32.

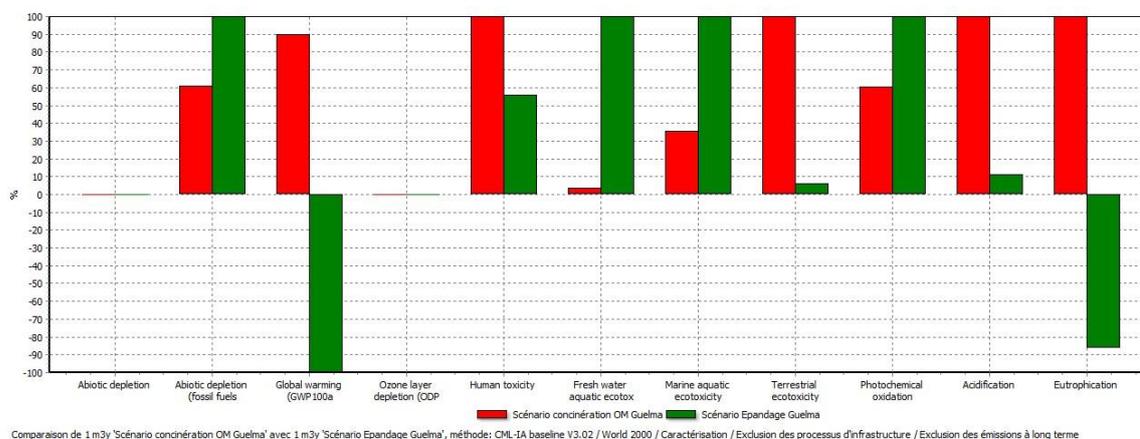


Figure 31 : Comparaison des scénarii C et D par la méthode CML

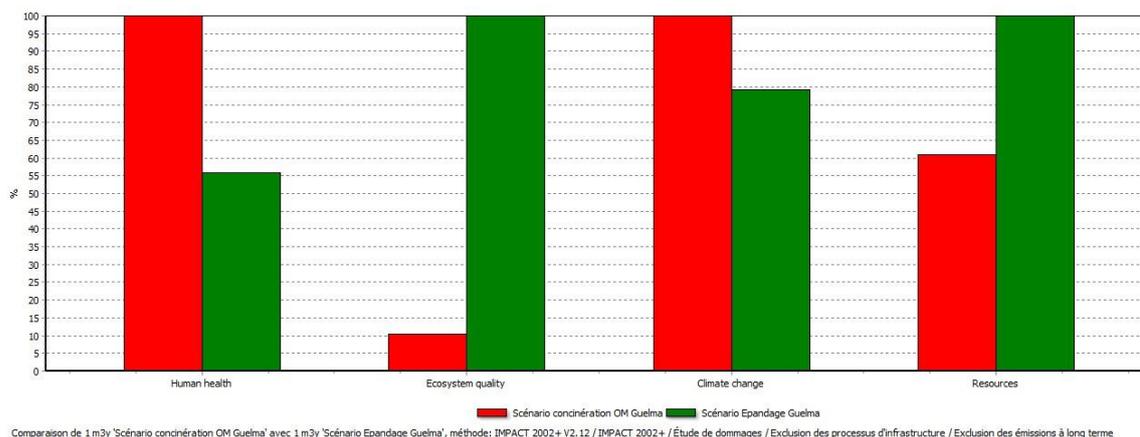


Figure 32 : comparaison des scénarii C et D par la méthode IMPACT 2002+

La co-incinération des boues en comparaison avec l'épandage réduit les impacts de l'épuisement des ressources fossiles, la pollution photochimique et l'écotoxicité des eaux douces et marines. Par contre le scénario d'épandage surclasse la co-incinération dans les impacts du réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation ainsi que la toxicité humaine et l'écotoxicité terrestre. La co-incinération des boues génère des pollutions atmosphériques telles que le CO₂ responsable de l'effet de serre, le CO de la pollution photochimique, les NO_x de l'acidification, l'eutrophisation et la toxicité humaine. Le mercure est la substance qui intervient dans les trois impacts d'écotoxicité. Il s'agit d'un exemple de déplacement de pollution par le changement d'une solution technologique. Le choix est aussi difficile : réduire la consommation des ressources ou l'impact d'effet de serre.

De plus, la réticence des agriculteurs d'utiliser les boues à cause du contenu en ETM ne facilite pas cette solution. Le compromis entre les voies de valorisation peut être une solution. Dans ce qui suit nous allons comparer les solutions d'épandage « C » et d'incinération « D » avec un scénario d'élimination des boues « E » où 65% seront épandues, 15% co-incinérées et 20% en CET.

1.4 Comparaison scénario C, D et E

La co-incinération surclasse les autres scénarii pour les ressources fossiles, la pollution photochimique, l'écotoxicité des eaux douces et marines. Le scénario d'épandage reste meilleur quant aux impacts de l'effet de serre, l'acidification, l'eutrophisation, la toxicité humaine et l'écotoxicité terrestre. D'un autre côté, la solution mixte « E » apporte des améliorations par rapport à la co-incinération « D » sur l'impact d'effet de serre, la toxicité humaine l'écotoxicité terrestre, l'acidification et l'eutrophisation. De plus, le scénario E réduit relativement l'impact d'épuisement des ressources fossiles, la pollution photochimique, l'écotoxicité des eaux douces et marines en comparaison avec le scénario C (figure 33).

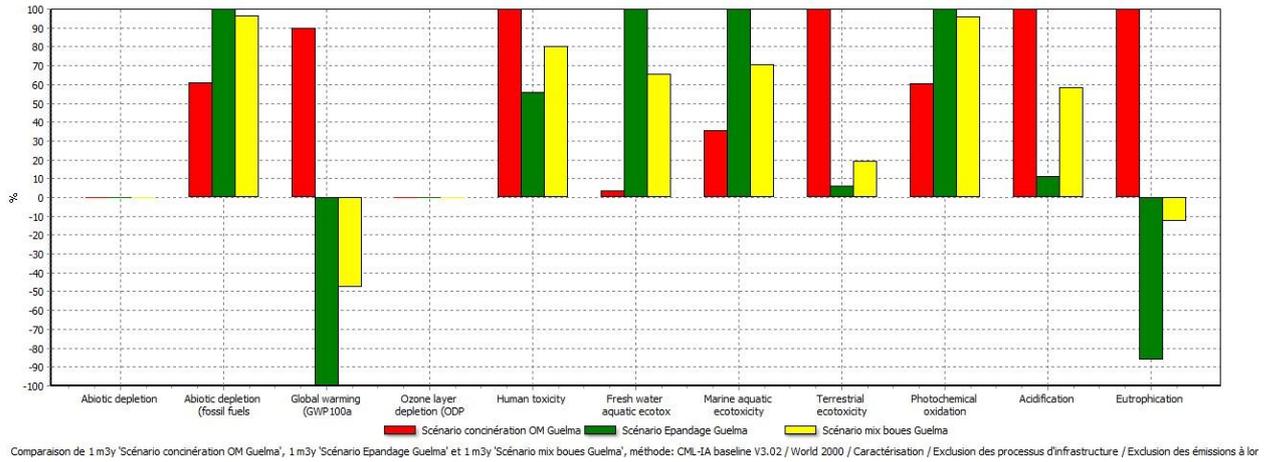


Figure 33 : comparaison des scénarii C, D et E avec la méthode CML

Là aussi nous nous confrontons à la difficulté du choix à cause de l'aspect multicritère des résultats de la méthode CML. Nous appliquons la méthode IMPACT 2002+ pour obtenir un score unique (figure 34).

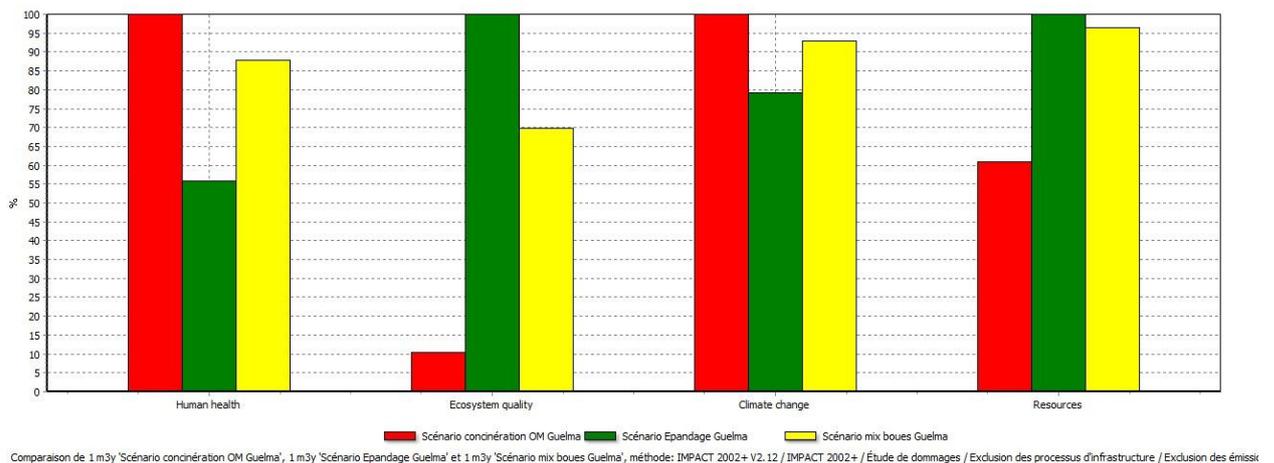


Figure 34 : Comparaison des scénarii C, D et E avec la méthode IMPACT 2002+

Les résultats sont également disparates et il est difficile de se concentrer sur un seul choix. Une analyse de sensibilité devrait être réalisée sur le scénario E sur le pourcentage des boues dans chaque voie d'élimination.

1.5 Analyse du cycle de vie du scénario C

Nous comparons les deux phases de construction (béton, acier) et d'exploitation (figure 35).

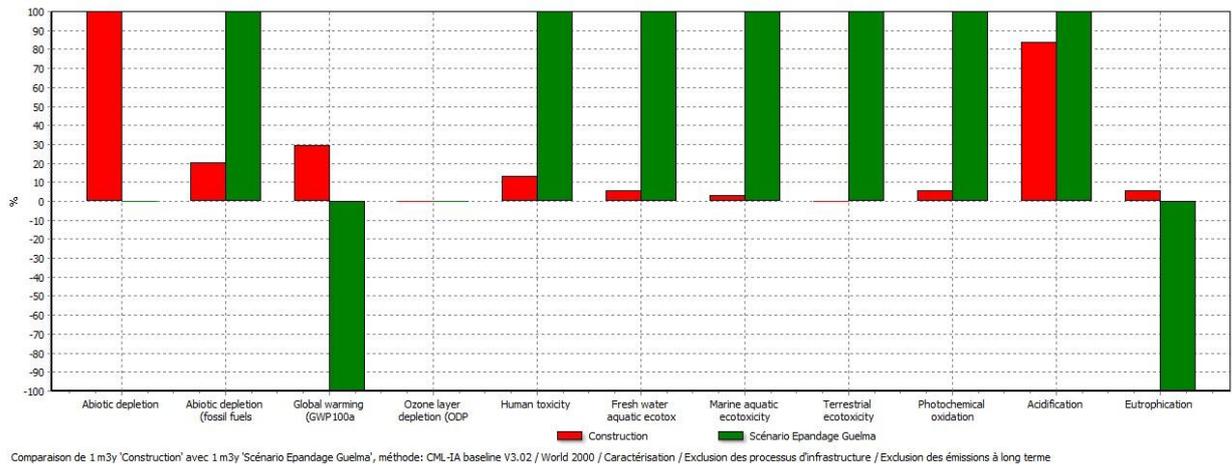


Figure 35 : comparaison de la phase de construction et d'exploitation du scénario C

La phase de construction est le maillon faible pour les impacts d'épuisement des ressources minières (production de l'acier et du ciment), l'effet de serre et l'eutrophisation. Par contre la phase d'exploitation a la plus grande charge environnementale dans le reste des impacts.

2. Analyse de sensibilité

2.1 Recyclage des boues en Cimenterie et des eaux traitées en Irrigation

Les effets de l'addition des boues sèches dans le cru cimentier ont été étudiés sur l'usine de fabrication de ciment de Maastricht aux Pays-Bas. Les études menées ont montré qu'un apport de boues à hauteur de 20 % en énergie est envisageable. Cet apport énergétique correspond à 140 t de boues/j à 93 % de siccité [30]. La fraction maximale des boues pouvant être utilisée varie de 2 à 4% par rapport au clinker. Il est nécessaire de limiter le chlore présent dans les boues (perturbateur du fonctionnement du four) et le phosphate responsable de la diminution de la résistance mécanique du ciment. La limitation du phosphate peut être réalisée par l'introduction d'une séparation membranaire avant le bassin d'aération. La séparation par électrolyse offre non seulement l'avantage de récupérer le phosphore, mais aussi les éléments traces métalliques [31]. Le couplage de l'électrolyse membranaire et la co-incinération en cimenterie offre les avantages suivants :

- Réduction du phosphate dans les boues qui peuvent être co-incinérées en cimenterie.
- Réduction des éléments traces métalliques dans les boues qui peuvent être épandues.
- Affinement du traitement des eaux qui peuvent être utilisées en Irrigation.

La liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées, fixé par l'arrêté interministériel de 2002 est montrée dans le tableau suivant :

Groupes de cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées	Liste des cultures
Arbres fruitiers (*)	Dattiers, vigne, pomme, pêche, poire, abricot, nêfle, cerise, prune, nectarine, grenade, figue, rhubarbe, arachides, noix, olive.
Agrumes	Pamplemousse, citron, orange, mandarine, tangerine, lime, clémentine.
Cultures fourragères (**)	Bersim, maïs, sorgho fourragers, vesce et luzerne.
Culture industrielles	Tomate industrielle, haricot à rames, petit pois à rames, betterave sucrière, coton, tabac, lin.
Cultures céréalières	Blé, orge, triticale et avoine.
Cultures de production de semences	Pomme de terre, haricot et petit pois.
Arbustes fourragers	Acacia et atriplex.
Plantes florales à sécher ou à usage industriel	Rosier, iris, jasmin, marjolaine et romarin.

Tableau 13 : Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées.

Sur la base de cette nouvelle perspective, nous construisons le scénario CCE « F » avec la valorisation des boues mixte de 40% en épandage (sans ETM), 30% en co-incinération en cimenterie et 30% en co-incinération avec les déchets urbain. Nous comptabilisons les impacts évités par le recyclage des boues en cimenterie et en épandage et l'utilisation des eaux en irrigation. L'analyse de l'inventaire est basée sur un prorata de la littérature d'une consommation de 4 kWh/m³ d'eau potabilisée, de 4% de boues utilisées par kilogramme de clinker. L'inventaire de la production des membranes est aussi comptabilisé à raison de 0.013 kg de PVCD/m³ d'eaux usées traitées. Nous comparons le scénario F avec les scénarii C et E avec la méthode CML (figure 36).

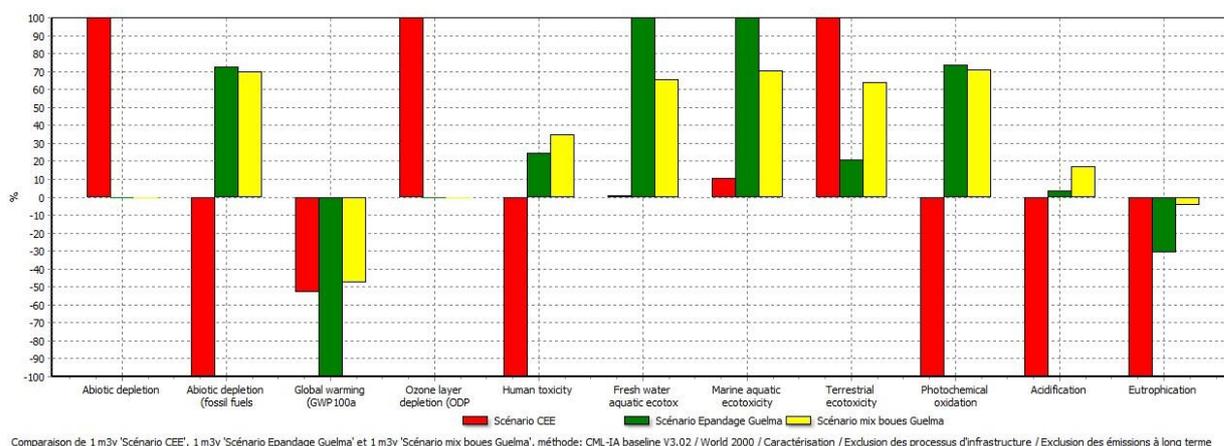


Figure 36 : comparaison des scénarii F, C et E par la méthode de CML

L'évaluation avec la méthode IMPACT 2002+ est illustrée sur les figures 37 et en score unique sur la figure 38.

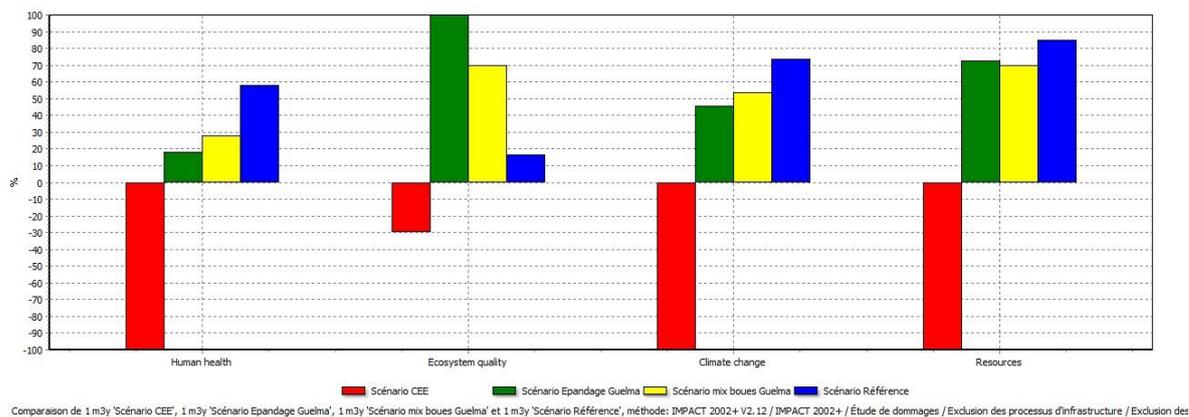


Figure 37 : comparaison des scénarii F, C, E et A par la méthode de IMPACT 2002+

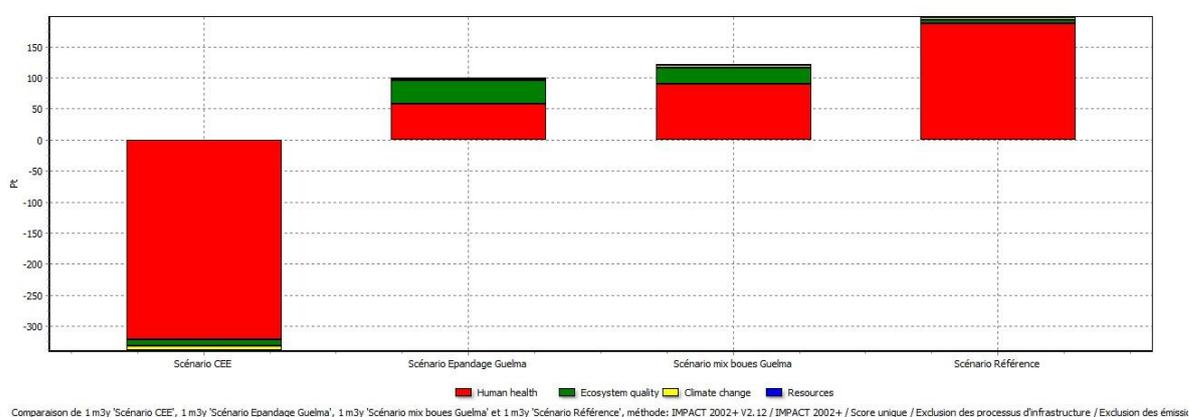


Figure 38 : comparaison des scores uniques F, C, E et A par la méthode de IMPACT 2002+

La solution CEE offre une amélioration drastique de tous les impacts à l'exception de l'épuisement des ressources minières utilisées dans la production du PVCD et l'écotoxicité terrestre due aux émissions de la co-incinération des boues. Cependant, l'impact sur l'utilisation des ressources en eau n'a pas été étudié parce qu'on n'a pas pu accéder aux modules dans la version démo du Logiciel SimPro.

2.2 Analyse de sensibilité sur le Mix-énergétique

Dans ce scénario « G », on suppose que 20% de l'énergie primaire du scénario « C » est remplacée par l'énergie renouvelable. On le comparera avec les scénarii C, E et F.

En comparant le scénario « G » avec son scénario de référence « C », on constate la réduction des impacts liés à la production d'électricité : l'épuisement des ressources fossiles, la toxicité humaine, la pollution photochimique, l'acidification et l'eutrophisation (figure 39). Par contre, l'introduction de 20% des énergies renouvelables dans le mix-énergétique (scénario G) ne surclasse pas le scénario « F » où la symbiose industrielle présente une solution pour la réduction des impacts. Par contre l'analyse avec la méthode IMPACT 2002+ montre que le scénario G permet une réduction dans tous les impacts en comparaison avec le scénario « C » (figure 40).

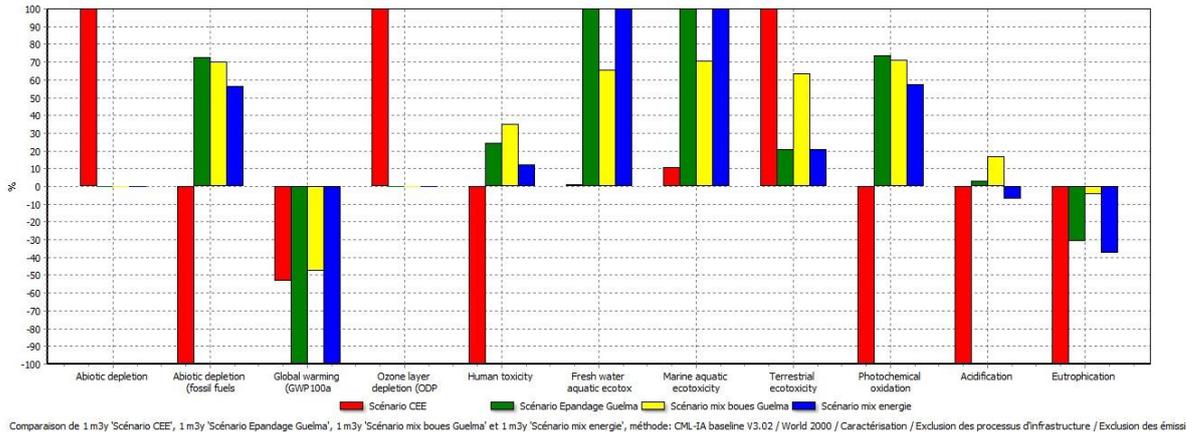


Figure 39 : Comparaison des scénarii C, E, F et G avec la méthode CML

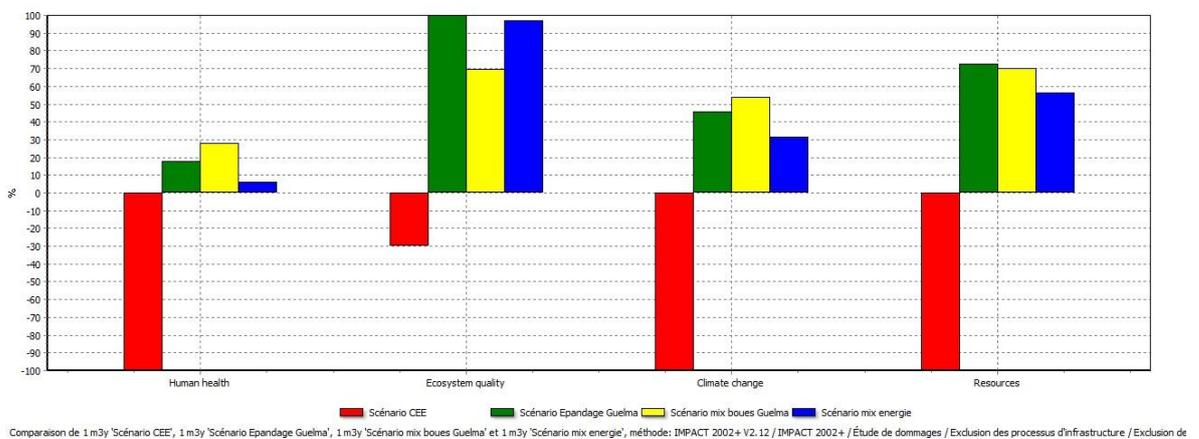


Figure 40 : Comparaison des scénarii C, E, F et G avec la méthode IMPACT 2002+

L'analyse par le score unique par la méthode IMPACT 2002+ donne le classement par rapport au scénario le plus éco-efficace (figure 41) : Scénario F, Scénario G, Scénario C, Scénario E. L'amélioration apportée par les énergies renouvelables est plus importante dans l'impact sur la santé humaine pour le scénario G mais elle est encore plus dans le scénario F.

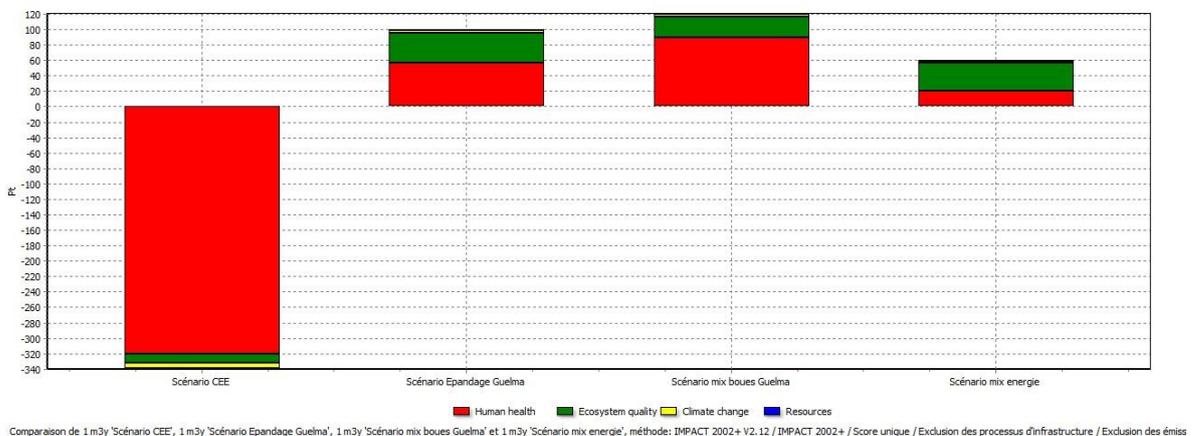


Figure 41 : Scores uniques des scénarii C, E, F et G par la méthode IMPACT 2002+

La méthode IMPACT 2002+ facilite le choix en agrégeant tous les critères en un seul score. Cependant, l'agrégation pondérée reste subjective et elle n'est pas recommandée par la norme.

3. Analyse d'incertitude

La vérification de la qualité des données est plus qu'importante pour évaluer l'incertitude sur la décision car les données influent directement et indirectement sur les critères d'impacts d'un côté, d'un autre côté, l'agrégation des indicateurs d'impacts rajoute une incertitude sur le score final et ainsi la décision. En effet, les unités de mesure des critères d'impacts diffèrent et le choix des facteurs de poids pour la pondération agrégée en unique score est arbitraire et dépend de la situation socio-économique de l'entreprise et de la pression politique (réglementations, taxe carbone, etc) et de la société civile (lobbying et associations protectrices de l'environnement. Les figures suivantes montrent que l'incertitude des données sur les concentrations des eaux traitées et les ETM dans les boues influent pour beaucoup dans pratiquement tous les impacts (critères). Sur la figure 42, l'analyse d'incertitude avec la méthode de Monté Carlo sur le scénario C montre l'effet des la qualité des données sur la majorité des critères d'impacts, particulièrement l'impact de l'acidification (figure 43), l'écotoxicité terrestre et l'écotoxicité d'eau douce. Les coefficients de variations sont respectivement de 11,3%, 6,51% et 3,94%.

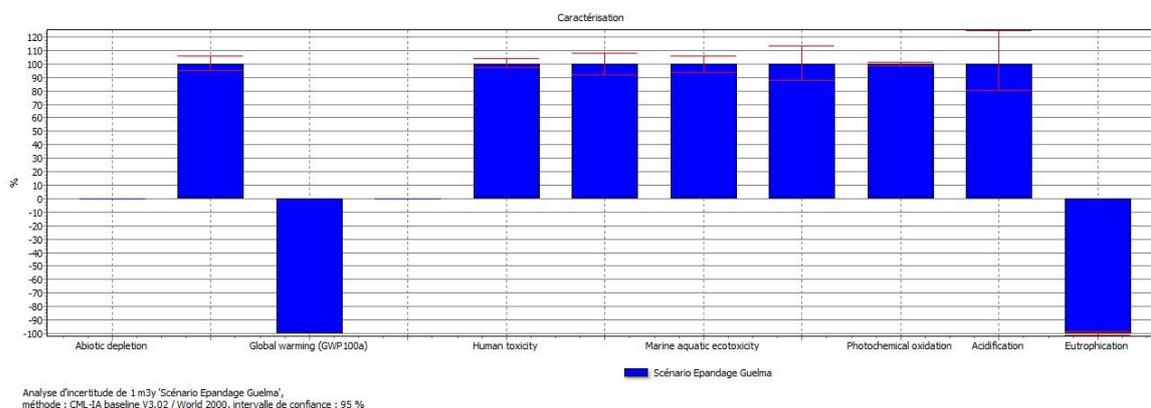


Figure 42 : Analyse d'incertitude du scénario C

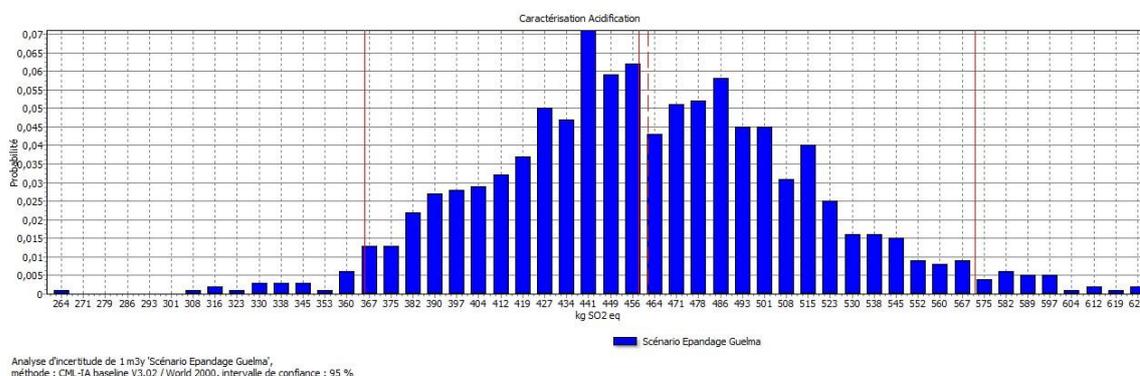


Figure 43 : Analyse d'incertitude sur le critère de l'acidification du scénario C

L'analyse d'incertitude sur la comparaison des scénarii C et E révèle qu'il y a plus d'incertitude côté scénario C sur les critères pollution photochimiques, écotoxicité marines et d'eau douce et épuisement des ressources fossiles et minières. Le scénario E a plus d'incertitude sur les critères d'eutrophisation, d'acidification, d'écotoxicité terrestre, de toxicité humaine et du réchauffement climatique (figure 44).

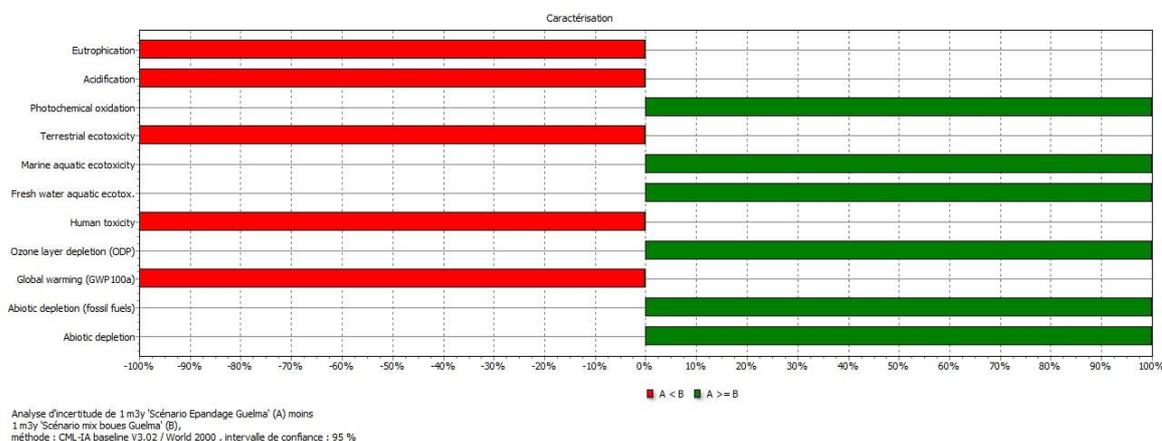


Figure 44 : Analyse d'incertitude comparative entre les scénarii C et E

4. Interprétations

L'analyse d'incertitude montre toute la difficulté qu'a le praticien de l'ACV de mener une étude ACV scientifiquement solide à cause de la qualité des données. Dans notre étude de cas, il a été difficile de collecter des données représentatives où nous avons eu recours à des estimations à partir de données bibliographiques. La norme préconise d'évaluer la qualité de l'inventaire par des descripteurs temporels, géographiques, technologiques et spécifiques aux sites sous l'étude. Des résultats d'études ACV réalisées en Europe ne peuvent être extrapolés à un autre contexte à cause des différences (par ex. le nucléaire est la source d'énergie principale en France alors qu'en Algérie ce sera le gaz naturel). D'autres critères sont recommandés par la norme tels que l'analyse de complétude, d'exactitude et de reproductibilité.

La cohérence des résultats est aussi liée aux indicateurs d'impacts utilisés. L'ensemble des indicateurs présents dans les bases de données sont liés à la situation géographique européenne (par pays, par région, par sous-compartiment). L'utilisation des indicateurs d'impacts globaux (effet de serre, épuisement des ressources) reste permise. Par contre, les bases de données concernant les impacts régionaux et locaux ne peuvent être utilisées. L'utilisation de ses bases de données pour l'étude de cas est une approche *à priori* d'aide à la décision dont les résultats servent de screening et doivent être appréhendés avec attention. Il est impératif de développer nos bases de données d'indicateurs d'impacts.

Les différents scénarii considérés montrent que la solution technique doit toujours être analysée avec une pensée de cycle de vie de façon systémique. L'ACV comme approche holistique permet

d'analyse la solution dans sa globalité. Ainsi, l'amélioration du bilan environnemental d'une usine passe par une minimisation de la consommation d'énergie primaire et ressources minière, la réduction de l'impact de transport et choisir la meilleure voie de valorisation et/ou recyclage des déchets. L'utilisation des principes de l'écologie industrielle et la dynamique des systèmes permettent de chercher et d'optimiser les meilleures symbioses industrielles.

La voie de valorisation mixte des boues en épandage et en co-incinération urbaines et en cimenterie permet non seulement de réduire l'impact global de l'Usine sous l'étude mais aussi agir sur toute la symbiose. Il est de même pour le recyclage des eaux traitées en Irrigation. Nous proposons une autre voie de valorisation des boues dans les HF de la sidérurgie. C'est une nouvelle perspective qui s'ouvre au génie des matériaux car la réalisation d'une telle symbiose est tributaire des caractéristiques physico-chimiques du déchet pour obtenir un produit industriel fiable.

La construction des symbioses industrielles est aussi tributaire de l'avis des décideurs (commanditaires de l'analyse) et des autorités publics. L'aspect multicritère de l'ACV ne facilite pas la tâche aux décideurs au sein de l'entreprise de préférer une telle solution sur une autre. Le recours aux méthodes scores uniques peut supprimer cette difficulté, bien que cette méthode ne soit pas plausible du point de vue scientifique. Les praticiens au sein des entreprises développent une Evaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie (ESQCV) en réduisant le nombre de critères d'impacts. Les pouvoirs publics doivent jouer un rôle important pour encourager les symbioses industrielles et la publication des réglementations en matière d'environnement, car, en Algérie elles restent très limitées.

Les réglementations en matières de rejets ne doivent pas être uniformes car les écosystèmes sont différents d'une zone géographique à une autre. La réforme des institutions permet aux assemblés préfectoraux et municipaux d'adapter la réglementation en fonction de la situation géographique.

La nécessité de réformes de la gouvernance s'impose quant à la préservation des eaux de surfaces. Le recyclage des eaux usées traitées en Irrigation ou en Industrie permet une économie conséquente du potentiel hydrique lequel est limité dans notre pays. L'utilisation des procédés de séparation tels que les membranes représente une solution technique intéressante qui peut encourager les industriels et les agriculteurs. Cependant, l'exemple présenté dans l'étude montre que la charge environnementale est déplacée vers la production des membranes nécessitant une quantité importante de ressources non renouvelable.

La minimisation de la consommation de l'énergie primaire et des ressources minières passe par l'amélioration du mix-énergétique avec les énergies renouvelables et le recyclage au maximum des ressources minières et aussi par l'utilisation des biomatériaux. Elle peut être aussi réduite par la minimisation de l'impact du transport dans l'activité de l'usine.

Le transport contribue fortement dans l'épuisement des ressources et les impacts liés à la santé humaine et la qualité de l'écosystème, particulièrement à cause de l'émission des ETM. La contamination des sols par les éléments traces liées à la circulation automobile vient du carburant, les huiles des moteurs, caoutchouc, l'usure des pneus, les plaquettes des freins, la corrosion et les revêtements des chaussées. Ces émissions doivent être surveiller afin de prévoir leur transfert car ils se trouvent à cause des lessivages des chaussées dans les réseaux d'assainissement et ainsi les STEP. Par exemple, le mercure, le plomb et le cadmium changent de forme chimique, se transportent et ne se détruisent pas. Les sources directes des pollutions marines sont la pollution par les navires, activités « off shore », mais la pollution marine est aussi alimentée par une pollution fluviale et terrestre.

La liste de métaux lourds à surveiller varie selon les milieux considérés : émissions atmosphériques, rejets dans l'eau, règles sur l'épandage des boues ou la mise en décharge. En France, l'estimation (en %) des émissions atmosphériques par secteurs est donnée dans le tableau 14 :

	Evolution en tonnes				Répartition en % (en 1998)			
	1990	1995	1998	2002	Energie	Industrie	Transports	Autres
Arsenic (As)	24,1	21	22,3	18,5	6	93		1
Cadmium (Cd)	15,7	13,4	14	14,1	1	86		13
Chrome (Cr)	376	194	240	256	1	99		
Cuivre (Cu)	92,3	90,4	91,4	90,8	3	35	60	2
Mercure (Hg)	43,4	37,5	36,2	33,8	9	85		6
Nickel (Ni)	280	229	225	218	48	47		5
Plomb (Pb)	4.576	1.605	1.190	387		27	72	1
Sélénium (Se)	10,8	11,2	12	12,1	6	92		2
Zinc (Zn)	1.938	1.297	1.505	1.570	1	97		2

Tableau 14: Evolution et origines des émissions de métaux lourds dans l'air en France

L'amélioration doit encourager la suppression définitive du marché de l'essence contenant du plomb. Les émissions sont passées en France de plus de 4.000 tonnes en 1990 (le transport routier est alors responsable de 90 % des émissions atmosphériques de plomb) à 800 tonnes en 1998.

En conclusion, la maîtrise du cycle des métaux lourds ou les ETM dans la technosphère est plus qu'important, d'une part pour réduire leurs impacts, et d'autres, pour leurs recyclabilités maximales. Cette perspective fera l'objective du travail de Master, présenté ci-joint.

VI. Conclusions et perspectives

Dans ce projet de fin d'étude l'objectif est de procéder à une Analyse de Cycle de Vie d'une usine. Le choix a porté sur une usine de traitement des eaux usées, un segment du tissu industriel. Le manuscrit du PFE porte sur une présentation du contexte de l'étude et les raisons d'utilisation de la méthodologie de l'ACV pour l'organisation d'une usine. C'est le seul outil permettant d'évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie d'un système afin d'éviter les déplacements des pollutions. Considérée comme un outil d'aide à la décision, elle a l'avantage d'être une méthode standardisée selon les normes ISO. Ce qui représente un avantage en termes de rigueur méthodologique et de reconnaissance

L'étude menée dans ce projet montre la nécessité de mener d'autres ACV sur les segments industriels algériens afin d'améliorer la qualité des données de l'inventaire et de construire une base de données exhaustive. Les résultats d'une ACV sont géographiquement dépendants de la zone d'où proviennent les données. La réticence des industriels à ce genre d'étude représente la plus grande difficulté afin d'établir ces bases de données. L'autre difficulté est l'aspect multicritère de l'outil ACV qui se rajoute dans une perspective de décision sur la stratégie d'une entreprise aux autres critères économiques et socio-culturels.

Il est aussi important de développer des bases de données des indicateurs d'impacts propres à notre situation géographique. L'absence de normes environnementales et de mesures des polluants en Algérie contribue au freinage du développement de cet outil. L'ACV évalue des impacts potentiels, non des impacts réels. Les résultats ne donneront donc pas d'informations sur les dépassements de normes ou les risques environnementaux. Les normes environnementales doivent être flexibles d'une zone à une autre ce qui impose une décentralisation de la gouvernance.

L'ACV menée sur la STEP de Guelma a montré que son bilan environnemental pourrait être amélioré par une valorisation énergétique et nutritive des boues. Le recyclage des eaux usées en Irrigation ou en industrie serait le déficit des exploitants et les collectivités locales dans les années à venir. La seule contrainte reste les caractéristiques des boues et des eaux qui doivent être analysées et adaptées pour l'opération de recyclage/valorisation choisie. Le développement de symbioses industrielles permet de traiter le problème environnemental d'un point de vue global. La production de l'électricité et le transport sont les maillons faibles de la segmentation industrielle. Il est impératif d'améliorer le mix-énergétique et de limiter le facteur pollueur du transport. L'industrie et le transport contribuent par les retombées atmosphériques aux fortes concentrations des ETM se trouvant les eaux traitées et les boues séchées se qui limite leurs potentiels de valorisation.

Bibliographie

- [1] : ONA., (www.ona-dz.org), consulté en **avril 2016**.
- [2] : Meadows et al., Limits of Growth, **1972**.
- [3] : Caroline SABLAYROLLES., Évaluation environnementale et Analyse de Cycle de Vie, **Juin 2013**.
- [4] : Mehdi BELHANI., Analyse de cycle de vie exergétique de systèmes de traitement des eaux résiduaires, **2008**.
- [5] : Tereza BICALHO., Les limites de l'ACV Etude de la soutenabilité d'un bio diesel issu de l'huile de palme brésilienne, **2014**.
- [6] : ISO 14044 International Standard: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines, International Organization for Standardization, Geneva, **2006**.
- [7] : Schneider F., Chevalier J. et Navarro A., Problèmes d'affectations dans les analyses de cycle de vie, Les Techniques de l'ingénieur, Paris : **1998**, G 5 550, 14p.
- [8] : Christiansen K, ed., Simplifying LCA: Just a Cut? SETAC Europe, LCA Screening and Streamlining, Working Group, Final report, Mars, **1997**.
- [9] : Dincer I., et Rosen M. A., Exergy as a drive for achieving sustainability, International Journal of Green Energy, **2004**, 1(1), 1 -19.
- [10] : ISO., (www.iso.org/iso/fr), consulté en **avril 2016**.
- [11] : OCDE, 1992, OCDE Bonnes pratiques pour les études de l'impact sur l'environnement exercé par les projets de développement, Comité d'aide au développement, Lignes directrices sur l'environnement et l'aide n°1, **1992**, 18 p.
- [12] : IPCC, Climate Change 2007 – The physical science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, February, **2007**, 18 p.
- [13] : Henry, J.G. and Heinke, G.W., Environmental Science and Engineering, second edition, Prentice Hall, New Jersey, **1996**.
- [14] : Rousseaux P., Analyse du cycle de vie, Evaluation des impacts, Techniques de l'ingénieur, traité Génie industriel, **1998**, G 5 605, 10 p.
- [15] : Khalifa K., Analyse du cycle de vie, Problématique de l'évaluation des impacts, Techniques de l'ingénieur, traité Génie industriel, **2002**, G 5 610, 10 p.
- [16] : Cooper, C.D. and Alley, F.C., Air Pollution Control: A Design Approach, second edition, Waveland Press, INC, Illinois, **1994**.
- [17] : Koroneos C., Dompros A., Roumbas G., Moussiopoulos N., Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes, International Journal of Hydrogen Energy, **2004**.

- [18] : Schneider F., Chevalier J. et Navarro A., Problèmes d'affectations dans les analyses de cycle de vie, Les Techniques de l'ingénieur, Paris : **1998**, G 5 550, 14p.
- [19] : Basset-Mens C., Propositions pour une adaptation de l'Analyse de cycle de vie aux systèmes de production agricole. Mise en œuvre pour l'évaluation environnementale de la production porcine, Thèse de Doctorat, Institut National de la Recherche Agronomique, **2005**, 244 pp.
- [20] : UNEP., —Life cycle thinking as a solution, United Nations Environment Programme, 2003. 3 p., (<http://www.uneptie.org/pc/sustain/lcinitiative/background.htm>), consulté **10 avril 2016**.
- [21] : ISO 14041a., International Organization for Standardization, Environmental Management Life Cycle Assessment - Goal and scope definition, ISO 14041. Geneva, Switzerland, **1998**, 27p.
- [22] : Coulon R., Camobreco V., Teulon H. et Besnainou J., Data quality and uncertainty in LCI, the International Journal of LCA, **1997**, Vol.2, N.3, 178-182.
- [23] : Kennedy D., Montgomery D., Quay B., Data Quality: Stochastic Environmental Life Cycle Assessment Modeling, the International Journal of LCA, **1996**, Vol.1, N.4, 199-207.
- [24] : ISO 14041b., International Organization for Standardization, Environmental Management Life Cycle Assessment - Inventory Analysis, ISO 14041. Geneva, Switzerland, **1999**.
- [25] : Notice de Guelma., NOTICE D'EXPLOITATION CLASSEUR A-B-C-D-ind. C
- [26] : SIMAPRO., (<https://simapro.com/>), consulté **1 mai 2016**.
- [27] : Energie gouvernement algérien., (<http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=la-production-d-electricite-2>), consulté en **avril 2016**.
- [28] : Renou S., Analyse de cycle de vie appliquée au traitement des eaux usées, Thèse, INPL-Nancy, **2006**.
- [29] : Bengtsson M., Lundin M., Molander S., Life cycle assessment of wastewater systems - Case studies of conventional wastewater treatment, usine sorting and liquid composting in three Swedish municipalities, Technical Environmental Planning report, Chalmers University of Technology, **1997**.
- [30] : Gay J., Lutte contre la pollution des eaux. Valorisation énergétique des boues, Techniques de l'ingénieur, Traité Environnement, **2002**, G1 455.
- [31] : Ebbers B., Ottosen L. M., Jensen P. E., Electrodialytic treatment of municipal wastewater and sludge for the removal of heavy metals and recovery of phosphorus, Electrochimica Acta 181 (**2015**) 90–99.

Annexe 1

Outil	Objet	Echelle et cycle de vie	Effets et substances considérés	Effets rapportés à	Éléments utilisés
AFS	Substance Polluante	Régionale ou globale cycle de la substance	Pas d'effet substance unique	Temps et région donnée	Bilan de masse modèle multimédia
AR	Installation ou produit chimique	Locale ou régionale	Toxicité	Période donnée	Modèle multimédias évaluation de l'effet
AFM	Matériau matière première	Régionale ou nationale	-	Temps et région donnée	Bilan de masse comptabilité de flux de matière
BC	Activité ou entreprise	Globale totalité du cycle de vie	Emissions de gaz à effet de serre Changement climatique	Produit, service région ou entreprise	bilan de masse potentiel d'effet de serre
EIE	Nouvelle activité localisée	Locale effet locaux	Variable selon l'auteur de l'étude	Capacité d'absorption locale	Variable selon l'auteur d'étude
ACV	Produit, service ou procédé	Globale totalité de cycle de vie	Effets multiples grand nombre de substances	Fonction du produit, service ou procédé	Bilan de masse Impact environnemental Modèles multimédias

Annexe 2

Utilisation/Problématique	Améliorer	Sélectionner	Contrôler/Gérer	Réglementer	Eduquer/informer	Vendre
Comparaison de systèmes concurrents	Veille technologique	Investissement (achat, conception), argumentation pour des décisions stratégiques (modes de transport)		Ecolabels	Eduquer le public à la consommation écologiquement responsable	Marketing « vert » sur le thème « mon produit est le plus respectueux de l'environnement »
Comparaison des étapes du cycle de vie d'un même système	Identification des améliorations possibles, diagnostic environnemental	Dégagement de priorités en matière de politiques publiques (identification des étapes sensibles pour développer des stratégies), diagnostic environnemental	Gestion sur le cycle de vie (management environnemental)	Ecolabels, proposition de nouvelles normes	Sensibiliser le public sur les transferts de pollution, sur le cycle de vie d'un produit dans le but de développer la consommation « verte », éliminer des préjugés	
Comparaison d'un système et de ses alternatives	Evaluation des solutions d'amélioration proposées, veille technologique	Investissement (achat, conception), argumentation pour des décisions stratégiques (systèmes énergétiques)		Ecolabels	Eduquer le public à la consommation « verte », sensibiliser le public sur le thème « il existe des solutions meilleures pour l'environnement »	Marketing « vert » sur le thème « mon produit est le plus respectueux de l'environnement »
Comparaison d'un système avec une référence			Analyse de conformité	Justification des réglementations en vigueur		Marketing « vert » sur le thème « mon produit respecte les normes en vigueur »

Tableau : Applications de l'ACV [18]

Annexe 3 : Tableau récapitulatif sur les effets toxiques et écotoxiques des métaux

Élément chimique	Formes de toxicité	Effets toxiques à long terme		Effets écotoxiques à long terme
		<i>par inhalation</i>	<i>par ingestion</i>	
Mercure Hg	1-Métal (Hg) 2-Sels - mercurieux (Hg ⁺) - mercuriques (Hg ²⁺) Composés organomercuriques	1-Irritation bronchique Nécrose rénale Neurotoxique 2-Irritation bronchique	2-Inflammation des muqueuses Effets neurotoxiques centraux et périphériques Atteintes rénales Effets tératogènes	-une diminution du taux de germination des semences végétales -endommager le nucléole des cellules ce qui provoque une interruption de la synthèse de l'ADN. -pollution mortel
Plomb Pb	1-Métal (Pb ⁰) 2-Composés (Pb ²⁺ , Pb ⁴⁺) - oxydes - sels - composés organoplombiques (plomb tétraéthyle...)	1-Saturnisme Atteintes neuronales et rénales 2- Saturnisme Atteintes neuronale, rénale... Reprotoxique	1-Saturnisme 2-Saturnisme Atteintes neuronale, rénale... Reprotoxique	-la diminution de la concentration en chlorophylle dans la plante -une perturbation des enzymes du cycle de Calvin -endommager le nucléole des cellules ce qui provoque une interruption de la synthèse de l'ADN. -pollution mortel
Cadmium Cd	1-Métal (Cd ⁰) 2-Dérivés (Cd ²⁺) - oxyde - sulfure	1-Atteintes pulmonaires (pneumonie) Atteintes rénales (cancer) 2- Atteintes pulmonaires et rénales Ostéomalacie (ramollissement osseux) Cancers	2- Atteintes rénales Ostéomalacie Hypertension Cancers (bronches, reins, prostate...) Reprotoxique	-une moins grande assimilation de Potassium (à la suite de l'effet de compétition) et provoquer une carence de ce nutriment. -pollution des inter-couches terrestre à long terme. - induit des dommages aux membranes des graines en plus de diminuer les réserves de nutriment de l'embryon végétal contenues dans les cotylédons. 18 -endommager le nucléole des cellules ce qui provoque une interruption de la synthèse de l'ADN.
Cuivre Cu	1-Métal (Cu ⁰) 2-Sels - sulfate - autres sels	2-Irritants des voies respiratoires	2-Irritants Anémie Cirrhose	la diminution de la concentration en chlorophylle dans la plante -une perturbation des enzymes du cycle de Calvin
Aluminium Al	1-Métal (Al ⁰) 2-Sels (Al ³⁺) - chlorure - sulfate - phosphate	1-Asthme Fibrose pulmonaire possible	2-Neurotoxique central possible (Alzheimer)	-Mortalité des micro-organismes, plantes -pollution mortel
Chrome Cr	1-Métal (Cr ⁰) 2- Dérivés : a) Sels trivalents Cr ³⁺ b) Composés hexavalents Cr ⁶⁺ (chromates...)	1-Irritant des voies respiratoires 2-a) Irritants Allergisants 2-b) Irritants puissants Corrosifs Allergisants Mutagènes Cancérogènes...	2-a) Irritants Allergisants 2-b) Allergisants Cancérogènes	-la diminution de la concentration en chlorophylle dans la Plante -une baisse de photosynthèse à la suite d'une altération du transport des électrons - une perturbation des enzymes du cycle de Calvin
Nickel Ni	1-Métal (Ni ⁰) 2-Oxydes (NiO...) 3- Sels (Ni ²⁺) a) Insolubles (sulfures...) b) Solubles (chlorure, sulfate, nitrate...)	1-Allergies 2- Inflammation bronchique Cancer bronchique 3-a) Inflammation bronchique Cancer des sinus, des bronches 3-b) Allergie Cocancérogènes Reprotoxiques	3-b) Allergie Cocancérogènes Reprotoxiques	-la diminution de la concentration en chlorophylle dans la plante - une baisse de photosynthèse à la suite d'une altération du transport des électrons - affectait l'activité de plusieurs enzymes (amylase, protéase et ribonucléase), ce qui retardait la germination et la croissance chez les différentes plantes étudiées
Zinc Zn	1-Métal (Zn ⁰) 2- Composés - silicate (zircon) - oxydes - lactate	1- Pneumoconiose Allergies Granulome pulmonaire 2- Cancérogène probable chez l'animal	2-Granulome (lactate)	-une diminution du taux de germination des semences végétales -pollution mortel

Annexe 4 : Origines et formes toxiques des métaux par segment industriel

Elément chimique	Espèce chimique		Utilisations
Aluminium (Al)	-Métal (Al ⁰)		Alliages (aéronautique) additifs
	-Sels (Al ³⁺) - chlorure - sulfate - phosphate		Chlorure : antitranspirant* Sulfates (aluns) : épuration des eaux Phosphates : vaccins, additif alimentaire.
Cadmium (Cd)	-Métal (Cd ⁰)		Accumulateur Cd /Ni Cadmiage Soudure
	-Dérivés (Cd ²⁺) - oxyde - sulfure		Cadmiage, Piles solaires Réacteurs nucléaires Pigments...
Chrome (Cr)	-Métal (Cr ⁰)		Alliages
	- Dérivés :	Sels trivalents Cr ³⁺	Tannage
		Composés hexavalents Cr ⁶⁺ (chromates...)	Chromatage Pigments
Cuivre (Cu)	-Métal (Cu ⁰)		Alliages Amalgames dentaires Matériels électriques
	-Sels - sulfate - autres sels		Fonderie Bactéricide Additif alimentaire
Mercure (Hg)	-Métal (Hg)		Appareils de mesure Catalyseur Amalgames dentaires
	-Sels - mercurieux (Hg ⁺) - mercuriques (Hg ²⁺) Composés organomercuriques		Antiseptiques Antibactériens Catalyseurs Vaccins
Nickel (Ni)	-Métal (Ni ⁰)		Alliages, batteries Cd /Ni Bijoux, piercings
	-Oxydes (NiO...)		Métallurgie
	- Sels (Ni ²⁺)	Insolubles (sulfures...)	Métallurgie
		Solubles (chlorure, sulfate, nitrate...)	Métallurgie Nickelage
Plomb (Pb)	-Métal (Pb ⁰)		Canalisations Soudures Accumulateurs Alliages
	-Composés (Pb ²⁺ , Pb ⁴⁺) - oxydes - sels - composés organoplombiques (plomb tétraéthyle...)		Pigments Pesticides Additif (essence)
Zinc (Zn)	-Métal (Zn ⁰)		Métallurgie Galvanoplastie
	- Composés - silicate (zircon) - oxydes - lactate		Peintures, lubrifiants, cosmétiques ,additifs médicaments

