

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Thèse de Doctorat

Présentée par :

BENALI Ali

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT - LMD** en :

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés organiques

**Analyse comparative du cycle de vie de deux systèmes
d'éclairage public**

Devant le jury composé de :

Mr BENRACHEDI Khaled	Professeur	UMBB	Président
Mr LOUHAB Krim	Professeur	UMBB	Directeur
Mr AKSAS Hamouche	Professeur	UMBB	Co- Directeur
Mr NASRALLAH Nouredine	Professeur	USTHB	Examineur
Mr MOUFFOK Benali	Professeur	U. S. Belabes	Examineur
Mr HACHEMI Messaoud	Professeur	UMBB	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

تحظى الرهانات البيئية باهتمام الهيئات العلمية والسياسية عبر العالم مما فسح المجال ببروز تدابير تشريعية وقانونية ومقاربات ومواصفات تهدف لمعالجة التأثيرات البيئية المختلفة.

تعتبر مواصفة الإيزو 14044 إطاراً منهجياً للقيام بدراسة وتحليل التأثيرات البيئية لدورة حياة منتج، خدمة أو نشاط ما.

تهدف هذه الدراسة الى تطبيق هذه المنهجية ضمن تحليل مقارن لدورة حياة أنظمة الإنارة العمومية التقليدية ونظام الإنارة باستعمال الثباتات « LED ».

خلال الدراسة تم إبراز ونمذجة المؤثرات البيئية المختلفة وتقنيات حساب مؤشراتها مع اختيار أنسب الطرق وأثرى قواعد البيانات وأقوى التطبيقات الحاسوبية (اللوجيستيات) ذات الصلة بتقنية تحليل دورة الحياة (ACV).

لقد أمكن التأكد، من خلال تقدير مؤشرات التأثيرات البيئية ومقارنتها وتفسير النتائج، من أفضلية النظام المعتمد على تكنولوجيا الثباتات « LED » بالمقارنة مع الأنظمة التقليدية الأخرى، كذلك التي تعتمد مصابيح الصوديوم عالية الضغط (364 نقطة مقابل 433 نقطة في المؤشرات المدمجة).

في المؤشرات الجزئية يلاحظ أن اللاد « LED » أكثر ضغطاً على البيئة في مرحلة إنتاجه مقارنة بتأثيرات مرحلة الإنتاج للأنظمة الأخرى. ويعود هذا التأثير السلبي بالأساس إلى إنتاج اللوح المبرد (89%) ومجمع التحكم Driver (7%) ذات التأثير المعترف في طبقة الأوزون.

ان التطورات التكنولوجية المتلاحقة زادت من الفعالية الإيكولوجية لأنظمة الإنارة عن طريق اللاد « LED » بحيث أن التأثير البيئي للأنظمة المنتجة بعد سنة 2020 صارت 40% أدنى تأثيراً من سابقتها.

تشير المراجع العلمية والتقنية ان الاعتماد على الطاقات المتجددة في تغذية شبكات الإنارة العمومية التي تعتمد اللاد « LED » والمزودة بتكنولوجيات ذكية يرفع من نجاعتها الطاقوية والبيئية بشكل معتبر.

الكلمات المفتاحية : التأثيرات البيئية، دورة الحياة، مؤشرات، الفعالية الطاقوية والبيئية.

Environmental issues have captured the attention of political and scientific bodies worldwide, leading to the enactment of numerous legislations, regulations, approaches, and standards addressing various environmental impacts. The ISO 14044 standard has outlined the methodological framework for studying and analyzing the environmental impacts of the life cycle of a product, service, or process.

This study aims to apply this methodology within the context of a comparative life cycle analysis of a conventional public lighting system and a lighting system based on LED technology. The study highlights and models the categories of environmental impacts, the calculation techniques for their indicators, as well as a relevant and well-argued choice of the assessment method, database, and LCA software used.

Through calculating, comparing, and interpreting environmental impact indicators, the advantage of LED lighting system over other technologies such as high-pressure sodium lamps was confirmed (364 points versus 433 points in aggregated scores).

At the level of partial indicators, LED causes more environmental pressure during its production phase compared to other systems. This unfavorable score is mainly due to the production of the cooler (89%) and the driver (07%) given their significant impact on photochemical ozone production.

Technological advances have improved the ecological efficiency of LED lighting systems to such an extent that the overall environmental impact of luminaires produced after 2020 is 40% lower than those produced earlier.

Bibliographic and technical references show that the use of renewable energies to power LED lighting systems equipped with smart technologies will significantly increase their energy and environmental efficiency.

Keywords: environmental impacts, life cycle, indicators, energy and environmental efficiency.

Résumé

Analyse comparative du cycle de vie de deux systèmes d'éclairage public

Les enjeux environnementaux retiennent l'attention des instances politiques et scientifiques dans le monde ce qui a favorisé la proclamation de législations, réglementations, approches et normes traitant les divers impacts environnementaux.

La norme ISO 14044 a décrit le cadre méthodologique d'étude et d'analyse des impacts environnementaux du cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'un processus.

La présente étude vise à mettre en application cette méthodologie dans le cadre d'une analyse comparative du cycle de vie d'un système d'éclairage public conventionnel et un système d'éclairage basé sur la technologie du LED.

La mise en exergue et la modélisation des catégories d'impacts environnementaux, des techniques de calcul de leurs indicateurs ainsi qu'un choix pertinent et argumenté de la méthode d'évaluation, de la base de données et du logiciels d'ACV ont été effectués au cours de cette étude.

A travers les indicateurs d'impacts environnementaux calculés, comparés et interprétés, l'avantage du système d'éclairage à LED comparativement aux autres technologies comme celle utilisant les lampes au sodium haute pression a été vérifié (364 points contre 433 points sur les scores agrégés).

Au niveau des indicateurs partiels, le LED engendre davantage de pression sur l'environnement dans la phase de sa production comparativement aux autres systèmes. Ce score négatif revient essentiellement à la production du refroidisseur (89%) et du driver (07%) au regard de leur impact sensible sur la production de l'ozone photochimique.

Les avancées technologiques ont amélioré l'efficacité écologique des systèmes d'éclairage à LED, si bien que l'impact environnemental global des luminaires produits postérieurement à 2020 est inférieur de 40% par rapport à celui de ceux produits antérieurement.

Les références bibliographiques et techniques montrent que le recours aux énergies renouvelables pour alimenter les systèmes d'éclairage à LED munis de technologies intelligentes augmentera de manière significative leur efficacité énergétique et environnementale.

Mots clés : impacts environnementaux, cycle de vie, indicateurs, efficacité énergétique et environnementale.

D é d i c a c e s

Je dédié ce travail :

A l'âme de mon père, que Dieu l'accueille dans son vaste paradis ;

*A ma Chère Mère dont ses prières ont toujours éclairé le chemin de
ma vie ;*

*A ma Chère Samira qui a toujours fortement contribué à mes
réussites ;*

*A Amina, Sami, Houssam, Sara, Rafik et Naïm qui m'ont toujours
donné la joie et l'ambiance pour me développer ;*

A mes Sœurs et Frères ;

A mes Nièces et Neveux et à toute ma famille.

R e m e r c i e m e n t s

*Mes vifs remerciements s'adressent particulièrement
aux Professeurs et Docteurs : LOUHAB, HACHEMI,
BENOTHMANE, BOUREGHDA, AKSAS,
BOUGHRARA, DAOUI, MOHAMMEDI et
ROUIBAH qui m'ont beaucoup aidé à mener à bout
mon parcours de Doctorat sans oublier les équipes
pédagogiques et administratives de la Faculté de
Technologie de l'université de Boumerdes*

Table des matières

Introduction générale.....	1
Positionnement du projet de recherche.....	4
Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET LE CONCEPT ACV	6
1. LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX.....	6
1.1. Empreinte écologique de l'humanité :.....	7
1.2. Dégradation de la Biodiversité :.....	8
1.3. Épuisement des ressources naturelles.....	8
1.4. Epuisement de ressources énergétiques des matières premières :.....	9
2. RÉPONSE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX :	11
2.1. Réduction de l'intensité d'émission	11
2.2. Augmentation de l'efficacité énergétique	11
2.3. Enlèvement du dioxyde de carbone	12
2.4. Modification du climat :.....	13
3. PRESENTATION DE LA METHODE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE	15
3.1. Le concept d'analyse du cycle de vie:	15
3.1.1. Cycle de Vie :	15
3.1.2. Analyse du Cycle de Vie – ACV :.....	15
3.1.3. Inventaire du Cycle de Vie – ICV :.....	15
3.1.4. Evaluation de l'Impact du Cycle de Vie – EICV:	15
3.1.5. Interprétation du cycle de vie :.....	15
3.1.6. Aspect environnemental :.....	16
3.2. La famille des normes ISO 14000.....	16
3.3. Les normes ISO 14040 et ISO 14044	22
3.4. Différentes méthodes d'analyse environnementale :.....	23
3.4.1. Les analyses dites monocritères :	23
3.4.1.1. Limitation :.....	23
3.4.2. Les analyses multicritères :.....	23
3.4.2.1. Avantages :.....	24
3.4.3. Les méthodologies orientées « produits » ou « services » :	24
3.4.4. Les méthodologies orientées «organisation» :.....	24
3.4.5. Les méthodologies quantitatives :	24
3.4.6. Les méthodologies qualitatives:.....	24
3.4.6.1. L'évaluation simplifiée et qualitative du cycle de vie – ESQCV :	25
3.4.6.2. Ecodesign Pilot :.....	25
3.4.6.3. Check-Lists :	25
3.4.7. Autres outils :.....	25
3.4.7.1. Bilan Environnemental des Emballages - BEE:.....	25

3.4.7.2. Instant LCA Textile web portal :	25
3.4.7.3. Spin'it :	25
3.4.7.4. Eco-Bat :	26
3.5. Champs d'application des méthodes d'évaluation environnementale.....	26
3.6. Avantages des outils d'évaluation	27
3.7. Synthèse et positionnement des outils de l'évaluation environnementale	30
4. La méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie – ACV	31
4.1. Historique de l'ACV	31
4.2. L'Analyse du Cycle de Vie et la norme ISO 14044 :	32
4.3. Cycle de vie d'un produit :.....	32
4.4. Répercussions des étapes du cycle de vie sur l'environnement :.....	33
4.4.1. L'extraction et la production des matières premières :.....	33
4.4.2. Le transport:.....	33
4.4.3. Le déballage, l'utilisation, et la maintenance du produit :.....	33
4.4.4. La valorisation (recyclage) et/ou l'élimination :	34
4.5. Les applications de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) :	34
4.5.1. L'ACVS et l'ACVE :	34
4.5.2. Un outil d'aide à la décision :.....	34
4.6. Autres applications possibles de l'Analyse du Cycle de Vie	34
4.7. Les phases d'une étude ACV :.....	35
4.7.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude ACV	37
4.7.2. Fonction et Unité Fonctionnelle (UF):	38
4.7.2.1. Exemples de formulation de l'UF.....	39
4.7.3. Flux de référence :	39
4.7.4. Les frontières du système :	40
4.7.5. Systèmes des produits et processus élémentaires :	40
4.7.6. Inventaire de cycle de vie (ICV) :.....	42
4.7.6.1. Inventaire des flux, collecte et analyse des données :.....	42
4.7.6.2. Inventaire des flux (énergétiques, matériaux) :	43
4.7.7. La collecte des données.....	44
4.7.8. Analyse de l'inventaire	45
4.7.8.1. Négligeabilité des flux et critères de coupure:.....	45
4.7.8.1.1. Quantitativement :.....	46
4.7.8.1.2. Qualitativement :	46
4.7.9. Les sources de données de l'inventaire :	46
4.7.9.1. Les bases de données	47
4.7.10. Caractéristiques et choix des données.....	48
4.8. Évaluation des Impacts du Cycle de Vie –EICV :	50
4.9. Méthodes d'évaluation d'impact :	51

4.9.1. Méthodes dites mid-point ou (méthodes orientées problèmes) :	51
4.9.2. méthodes dites <i>end-point</i> ou (ou orientées dommages) :	51
4.10. Coût d'une ACV :	52
4.11. Durée d'une ACV :	52
4.12. Utilité d'une ACV :	52
4.13. Limites de l'ACV	54
4.14. Potentialités de l'ACV	55
5. Conclusion :	55
Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV	57
1. METHODES D'EVALUATION DES IMPACTS PAR L'ACV	57
1.1. Présentation des principales méthodes de caractérisation des impacts	61
1.1.1. METHODE ReCiPe	62
1.1.2. CML 2001 :	63
1.1.3. IMPACT 2002+ :	65
1.1.4. Eco-Indicator 99 (EI 99)	65
1.1.5. TRACI	69
1.1.6. EDIP	69
2. BASE DE DONNEES D'ACV	73
2.1. Avantages de disponibilités des données pour les pouvoirs publics, milieux académiques et scientifiques	74
2.1.1. La Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire :	77
2.1.2. Profil Environnemental Produit :	77
2.2. Présentation des bases de données de l'ACV	78
2.2.1. ECOINVENT :	78
2.2.2. GABI DATABASE :	81
2.2.3. La Base INIES :	82
2.2.4. IMPACTS :	83
2.2.5. ELCD :	83
2.2.6. EIME :	84
2.2.7. Base Carbone :	84
2.2.8. ESU life cycle inventory data :	84
2.2.9. US-LCI :	85
2.2.10. DEAM / WISARD :	85
3. LES LOGICIELS D'ACV	89
3.1. SIMAPRO	90
3.2. UMBERTO NXT LCA	91
3.3. GABI	93
3.4. EQUER	94

3.5.	Bilan Produit.....	95
3.6.	ELODIE.....	96
3.7.	Open LCA	96
3.8.	EIME :	98
3.9.	Ecodesign Studio	100
3.10.	ECO-it	101
3.11.	Bilan Produit.....	102
4.	OUTILS SIMPLIFIES D'ACV.....	104
4.1.	TEAM.....	104
4.2.	WISARD	104
4.3.	EASETECH.....	104
4.4.	WRATE.....	105
4.5.	ORWARE.....	105
4.6.	MSW-DST or ISWM-DST.....	106
4.7.	CMLCA (Chain Management by Life Cycle Assessment)	106
4.8.	KCL-eco	106
4.9.	LCA-it	106
4.10.	REGIS	106
4.11.	QUANTIS SUITE 2.0	106
5.	LOGICIELS « CAO » AVEC MODULES POUR LA MESURE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	107
5.1.	SOLIDWORKS	107
5.2.	Inventor	108
5.3.	CES Selector.....	109
6.	COMPARAISON DES OUTILS LOGICIELS D'ACV	112
7.	CONCLUSION	116
Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION		117
1.	IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN PRODUIT OU D'UN SERVICE.....	117
1.1.	Évaluation des Impacts du Cycle de Vie –EICV	117
2.	ÉLEMENTS OBLIGATOIRES LORS DE L'EVALUATION DES IMPACTS	120
2.1.	Sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation	120
2.2.	Attribution des résultats de l'Inventaire du Cycle de Vie aux catégories d'impact sélectionnées (classification)	120
2.3.	Calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (caractérisation) :	121
3.	LES INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	122
3.1.	Les indicateurs d'impacts intermédiaires (midpoints) :.....	122
3.1.1.	Epuisement des ressources non renouvelables ou « Abiotic Depletion » :	123

3.1.2.	Acidification « acidification » :	123
3.1.3.	Ecotoxicité « Ecotoxicity »:	123
3.1.4.	Eutrophication « eutrophisation » :	123
3.1.5.	Toxicité des écosystèmes aquatiques d'eau douce « Freshwater Aquatic Ecotoxicity » :	123
3.1.6.	Réchauffement climatique « Global Warming »:	124
3.1.7.	Toxicité humaine « Human toxicity » :	124
3.1.8.	Usage des sols « Land Use »:	124
3.1.9.	Ecotoxicité marine « Marine Aquatic Ecotoxicity » :	124
3.1.10.	Oxydation photochimique « Photochemical Ozone Creation » :	124
3.1.11.	Épuisement de la couche d'ozone « Ozone layer depletion » :	124
3.1.12.	Ecotoxicité terrestre « Terrestrial ecotoxicity » :	124
3.1.13.	Mise en décharge des déchets non-dangereux, radioactifs, dangereux « Non-Hazardous Waste Landfilled, Radioactive Waste Landfilled, and Hazardous Waste Landfilled » :	125
3.2.	Calcul des indicateurs d'impacts intermédiaires :	125
3.3.	Les indicateurs de dommages (endpoints):	126
3.3.1.	La santé humaine :	126
3.3.2.	La qualité des écosystèmes :	126
3.3.3.	L'épuisement des ressources :	127
4.	METHODES DE CALCUL DE LA VALEUR DES INDICATEURS D'IMPACTS INTERMEDIARES (OU MIDPOINT) :	127
4.1.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire du Changement/Réchauffement climatique (effet de serre) :	129
4.2.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire d'épuisement de l'ozone stratosphérique - ODP :	132
4.3.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de la pollution photochimique :	134
4.4.	Calcul de la valeur de l'impact Intermédiaire d'épuisement des ressources :	136
4.5.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire d'acidification :	140
4.6.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire d'eutrophisation :	142
4.7.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de l'écotoxicité :	144
4.8.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de toxicité humaine :	148
4.9.	Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de la radiation ionisante :	150
5.	L'EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX FINAUX: CATEGORIES DE DOMMAGES (ENDPOINT)	153
5.1.	Les méthodes orientées dommages et la quantification des impacts finaux (end-point).....	153
6.	LA QUANTIFICATION DES DOMMAGES (OU IMPACTS ENDPOINT)	156
6.1.	La Santé humaine	157
6.2.	La qualité des écosystèmes.....	157
6.3.	Le changement climatique.....	157
6.4.	L'épuisement des ressources	157

6.5.	<i>Calcul des indicateurs de dommages</i>	158
6.5.1.	Calcul de la valeur de l'indicateur de dommage « <i>santé humaine</i> »	158
6.5.2.	Calcul de la valeur de l'indicateur de dommage « <i>qualité des écosystèmes</i> »	159
6.5.3.	Calcul de la valeur de l'indicateur de dommage « <i>épuisement des ressources</i> »	159
6.6.	<i>Normalisation des indicateurs de dommages</i> :	161
7.	Conclusion :	161
Chapitre IV : ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS (SHP) ET LUMINAIRE A « LED » ET PERSPECTIVES D'OPTIMISATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX		
163		
□	ETUDE PREALABLE SOULIGNANT L'IMPORTANCE D'UNE ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A LED	163
.1.	Introduction:	163
.2.	Objectifs de l'étude :	165
.3.	Présentation globale d'un système d'éclairage public et limites du système étudié :	166
.3.1.	Armoire d'éclairage public :	166
.3.2.	Câbles électriques :	167
.3.3.	Point Lumineux (Lampadaire).....	168
.3.4.	Mât ou support :	169
.3.5.	Crosse	169
.3.6.	Lanterne	169
.3.7.	Lampe ou source lumineuse	170
.3.7.1.	Lampe Sodium Haute Pression SHP	171
.3.7.2.	LED bleue, phosphore et synthèse de la lumière blanche	173
.3.7.3.	LED COB (Chip On Board)	173
.4.	Comparison entre les sources lumineuses (lampes/LEDs) :	175
.4.1.	Ballast	177
.4.2.	Ballast électronique	177
.4.3.	Driver de LED à courant constant	178
.5.	Les impacts environnementaux des systèmes d'éclairage public:	179
.5.1.	Les impacts en amont :	179
.5.1.1.	Empreinte carbone :	179
.5.1.2.	Empreinte métal (épuisement des ressources):	180
.5.2.	Les impacts environnementaux pendant l'implantation, l'exploitation et la maintenance.....	181
.5.2.1.	Les émissions de CO ₂ :	181
.5.2.2.	Impacts sur la faune.....	182
.5.2.3.	Impacts sur la flore	183
.5.2.4.	Impacts sur la santé humaine.....	183
.5.3.	Les impacts environnementaux en aval :	183
.6.	Approche méthodologique de l'étude:	184

.6.1.	Au plan de la réglementation et des normes :.....	185
.6.2.	Au plan de la conception :	185
.6.3.	Au plan de l'utilisation des sources lumineuses (lampes) :	187
□	REALISATION D'UNE ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A LED	190
.1.	METHODE.....	190
.2.	L'unité fonctionnelle :	191
.3.	Limite du système (champ de l'étude).....	191
.4.	Exclusions du champ de l'étude :	196
.5.	Plage de temps :	196
.6.	Limite géographique :	197
.7.	Inventaire (ICV) :	198
.8.	Calcul du score d'impact de chaque catégorie intermédiaire :	198
.8.1.	Normalisation :	198
.8.2.	La pondération :	198
.9.	RESULTATS :	199
.9.1.	Résultats d'ACV comparatives des performances environnementales des sources lumineuses:	199
.9.2.	Résultats d'ACV comparatives des performances environnementales des luminaires de différentes technologies:	200
.9.2.1.	ACV comparative entre luminaire HPS et luminaire LED :	200
.9.2.2.	Données relatives aux composants des luminaires et processus de fabrication :	201
.1.1.1.	Données relatives aux processus de fabrication des luminaires SHP et LED:	204
.1.1.2.	ACV comparative entre luminaire LED et luminaire CMH (Ceramic Metal Halide/Halogénure Métallique Céramique)	208
.1.2.	Interprétation	210
.1.2.1.	Approche et éléments d'interprétation des résultats d'ACV :	210
.1.2.2.	Interprétation des résultats globaux liés à l'intégralité du cycle de vie des deux (02) luminaires SHP et LED :	210
.1.2.3.	Interprétation des résultats partiels liés aux différentes phases du cycle de vie des deux (02) luminaires :	211
.1.2.3.1.	Comparaison de la phase de fabrication (Production) des deux luminaires :	211
.1.2.3.2.	Comparaison de la phase d'utilisation des deux luminaires (SHP et LED):	211
.1.2.3.2.1.	Confirmation de l'avantage du LED par rapport au SHP en phase d'utilisation :	213
.1.2.3.3.	Comparaison de la phase de fin de vie des deux (02) luminaires SHP et LED:	213
.1.2.4.	Comparaison des phases du cycles de vie au niveau du même luminaire :	214
.1.2.5.	Comparaison des contributions des composants dans la charge environnementale :	215
.1.2.6.	Catégories d'impacts pertinentes	217
.1.2.6.1.	Catégories d'impacts pertinentes engendrées par le luminaire SHP :	217
.1.2.6.2.	Catégories d'impacts pertinentes engendrées par le luminaire LED :	217

.1.3.	Interprétation de la comparaison entre les impacts environnementaux du luminaire LED et celui en CMH :	218
.1.4.	DISCUSSION ET CONCLUSIONS :	219
	OPTIMISATION DU SYSTEME D'ECLAIRAGE PUBLIC PAR LA SMART TECHNOLOGIE	221
.2.	Présentation générale de la smart technologie appliquée à l'éclairage public	222
.3.	Détection de présence et de mouvement (La bulle lumineuse) :	223
.4.	Le dimming :	226
.4.1.	Impact potentiel du dimming sur l'environnement :	227
.5.	La télégestion.....	227
.5.1.	Le système de gestion et de commande centralisée.....	228
.6.	La reconnaissance et l'intégration de l'environnement lumineux ou la gradation:	228
.6.1.	L'exemple du simulateur GEPPADI (Gestion des Parcs Publics d'Activités Durables et Intelligents)	229
□	OPTIMISATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX, ENERGETIQUES ET ECONOMIQUES DES SYSTEMES D'ECLAIRAGE PUBLIC PAR L'INTRODUCTION DES ENERGIES RENOUVELABLES (à panneau photovoltaïque)	231
.1.	Etude de cas :	231
.1.1.	coûts d'installation, d'utilisation et de maintenance des deux systèmes d'éclairage public (Installation A et B):	232
.2.	Optimisation de la durée de fonctionnement de l'EP :	234
.3.	Conclusion.....	235
□	TRAITEMENT, RECYCLAGE ET ELIMINATION DES DECHETS DES LUMINAIRES EN FIN DE VIE.....	236
.1.	Introduction:	236
.2.	Gestion des déchets, élimination et recyclage des composants des luminaires en fin de vie :	237
.3.	Traitement des déchets de fin de vie d'un luminaire :	237
.3.1.	Traitement des lampes (Circuit LED et autres lampes):	240
.3.1.1.	Déchargement.....	242
.3.1.2.	Stockage	242
.3.1.3.	Tri manuel	242
.3.1.4.	Broyage et captation du mercure par charbon actif	242
.3.1.5.	Aspiration des poudres et captation du mercure par charbon actif.....	242
.3.1.6.	Criblage	242
.3.1.7.	Séparation des métaux ferreux (Overband)	243
.3.1.8.	Séparation des métaux non ferreux	243
.3.2.	Traitement des composants électroniques :	244
.3.2.1.	Déchargement.....	244
.3.2.2.	Stockage	244
.3.2.3.	Pré-tri manuel et dépollution	244
.3.2.4.	Désintégreur (ouverture mécanique)	244

.3.2.5. Tri manuel	245
.3.2.6. Broyage.....	245
.3.2.7. Séparation des métaux ferreux (Overband)	245
.3.2.8. Tri manuel des bobines.....	245
.3.2.9. Tris spécifiques.....	245
.3.3. Le recyclage du plastique des DEEE.....	247
.3.3.1. Déchargement.....	247
.3.3.2. Stockage	247
.3.3.3. Alimentation de la ligne	247
.3.3.4. Séparation des métaux et autres indésirables résiduels	247
.3.3.5. Broyage.....	247
.3.3.6. Lavage	247
.3.3.7. Tri par type de résine.....	247
.3.3.8. Régénération : extrusion et granulation.....	248
.3.3.9. Recyclage plastiques en mélange	248
.3.3.10. Incinération avec valorisation énergétique	248
.3.4. Installation de stockage de déchets ultimes	249
.3.4.1. Captage des vapeurs toxiques des lampes :	249
.3.4.2. L'incinération-Stabilisation :	249
.3.4.3. La stabilisation-solidification-enfouissement :	250
.4. Conclusion.....	250
Conclusion générale	251
PERSPECTIVES.....	254
Références bibliographiques	256

Liste des tableaux

- Tab. I-1 : Estimation des durées d'épuisement des réserves si les taux de croissance de la production continuent aux rythmes des vingt dernières années*
- Tab. I-2 : Compendium des normes ISO 14000 et leur positionnement sur le cycle de l'amélioration continue (PDCA)*
- Tab. II-1 : les principales méthodes de calcul, le type d'impacts pris en charge «midpoint» ou «Endpoint», leurs niveaux d'évaluation.*
- Tab. II-2 : Liste non exhaustive des bases de données ACV*
- Tab. II-3 : comparaison simplifiée entre 3 logiciels d'ACV, OPENLCA, GaBi et SimaPro*
- Tab. II-4 : Liste non exhaustive des outils GWP et ACV*
- Tab. II-5 : Liste des critères retenus pour la comparaison des logiciels*
- Tab. II-6 : Résultats de la comparaison qualitative des outils logiciels d'ACV*
- Tab. III-1 : Exemple de conversion des résultats d'ICV en unités communes permettant le calcul des indicateurs de catégories d'impacts moyennant deux méthodes*
- Tab. III-2 : Etapes génériques de calcul du score d'une catégorie d'impact*
- Tab. III-3 : Les six gaz à effet de serre selon le Protocole de Kyoto*
- Tab. III-4 : Facteurs de caractérisation Ozone Depletion Potential (ODP) des différents gaz contribuant à l'impact « épuisement de l'ozone stratosphérique »*
- Tab. III-5 : Facteurs de caractérisation (POCP) des différentes substances contribuant à l'impact « pollution photochimique »*
- Tab. III-6: Facteurs de caractérisation (ADP) des différents gaz contribuant à l'impact «épuisement des ressources fossiles»*
- Tab. III-7 : Facteurs de caractérisation (AP) des différentes substances contribuant à l'impact acidification*
- Tab. III-8 : Facteurs de caractérisation (EP) des différentes substances contribuant à l'impact eutrophisation*
- . Tab. III-9 : Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact écotoxicité*
- Tab. III-10 : Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact toxicité humaine*
- Tab. III-11 : Facteur de caractérisation des substances contribuant à l'impact radiation ionisante*
- Tab. III-12 : Facteurs de caractérisation des dommages selon 3 approches*
- Tab. III-13 : des facteurs de normalisation fournis par la méthode IMPACT 2002+*
- Tab. IV-1 : Données caractéristiques de différents types de lampes classiques*
- Tab. IV-2 : Rendement en W/h des divers types de sources lumineuses*

Tab. IV-3 : Parc d'éclairage public et points lumineux en Algérie (2018)

Tab. IV-3bis : Exemple de données typiques de l'éclairage public à Alger, année 2021

Tab. IV-4 : Lampes HPS standards utilisées en Algérie et LED de dernière génération équivalentes.

Tab. IV- 4 bis : Données servant d'établissement de l'équivalence au plan de l'efficacité lumineuse entre lampes SHP, IOM.C et LED utilisées éclairage public.

Tab. IV-5 : Taux et quantité moyenne de CO2 émise en Kg par un luminaire d'éclairage public durant les phases du cycle de vie d'éclairage public pour une durée de vie de 20 ans

Tab. IV-6 : pourcentages des gains en consommation d'énergie selon plusieurs scénarios d'optimisation

Tabl. IV-7: pourcentages des gains annuels en consommation d'énergie et économique selon cinq (05) solutions d'optimisation pour une installation classique d'éclairage public de de 217 points lumineux (lampes en vapeur de mercure

Tab. IV-8 : Quantification des déchets résultant du démantèlement du luminaire : 200 w

Tab. IV-9 : Données d'Inventaire du Cycle de Vie du luminaire SHP selon Ecoinvent

Table IV-10 : Données d'Inventaire du Cycle de Vie du luminaire LED selon Econinvent

Tab. IV-11 : Comparaison du cycle de vie d'un luminaire SHP et d'un luminaire LED selon dix (10) indicateurs environnementaux

Tab. IV-11 bis : Comparaison de l'efficacité énergétique et l'empreinte carbone des luminaires SHP et à l'aide pendant la phase d'utilisation

Tab. IV-12 : Economie annuelle de la consommation d'énergie selon différentes valeurs et durées de dimming

Tab. IV-13 : Quantité en Kg de CO2 retenue pour 1MWh économisé en éclairage public alimenté par un bouquet électrique à dominance nucléaire

Tab. IV-14 : Economie en consommation annuelle (4376 heures) d'énergie sur un tronçon d'un km d'éclairage public pour différents scénarios en KWh

Tab. IV-15 : Tableau comparatif des coûts d'installation, d'utilisation et de maintenance de deux systèmes d'éclairage public sur une durée de 20 ans

Tab. IV-16 : Récapitulation des avantages des lampadaires solaires photovoltaïques utilisés en éclairage public

Tab. IV-17 : Quantification des déchets de démantèlement d'un luminaire

Liste des figures

- Fig. I-1 : Evolution de la température moyenne de la terre depuis de 1850 à 2025*
- Fig. I-2 : Les inondations de 2021 et 2022, un exemple d'événements climatiques extrêmes*
- Fig. I-3 : Evolution de l'empreinte écologique de l'humanité*
- Fig. I-4 : Déclin de la biodiversité et les scénarios prévus après 2030*
- Fig. I-5 : Evolution de la consommation des matières premières*
- Fig. I-6 : Méthodes d'analyse environnementale*
- Fig I-7 : Matrice des méthodes conventionnelles d'analyse*
- Fig. I-8 : Positionnement de neuf (09) outils d'évaluation environnementale selon les Sites/approches/impacts considérés par chacun d'eux.*
- Fig. I-9: Représentation simplifiée du Cycle de vie d'un produit*
- Fig. I-10 : Représentation détaillée du cycle de vie d'un produit*
- Fig. I-11 : Etapes de conduite d'une étude ACV selon ISO 14040 & 14044*
- Fig. I-12 : Représentation graphique des 04 phases successives d'une ACV comparative*
- Fig. I-13 : Système de produits et processus élémentaires*
- Fig. I-14 /: Ressources circulants à l'intérieur du système de produits constituant les flux entrants et sortants*
- Fig. I-15: Frontières du système dans une étude ACV*
- Fig. I-16 : classement des flux élémentaires et des flux non élémentaires des processus lors de l'analyse d'inventaire ACV*
- Fig. I-17 : Le modèle hiérarchique de Wang, Reddy et Kon relatif aux indicateurs de qualité des données*
- Fig. I-18 : Illustration du principe de transfert d'impacts*
- Fig. II-1 : Relations entre flux d'inventaire, points intermédiaires (problèmes) et finaux (dommages); les liaisons en pointillé sont très incertaines*
- Fig. II-2 : les trois niveaux d'évaluation d'impacts (Problèmes potentiels, dommages potentiels et score unique)*
- Fig.II-3 : Place des Bases de données, méthodes de calcul et logiciels dans une étude d'ACV*
- Fig. II-4 : Domaines d'activités et compatibilité d'Ecoinvent avec les méthodes ACV*
- Fig. II-5 : Alimentation et supervision technique et administrative de la Base de données INIES*
- Fig. II-6 : Cadre normatif de référence pour la base de données INIES*
- Fig. II-7: Génération d'un réseau de processus avec SIMAPRO*
- Fig. II-8 : Extrait de l'environnement du logiciel UMBERTO*

Fig. II-9: Utilisation de GABI pour la comparaison de la performance entre deux (02) scénarios

Fig. II-10 : Diagramme comparatif des indicateurs de 12 catégories d'impacts environnementaux des cycles de vie de trois variantes d'un produit obtenu par EQUER

Fig. II-11 : Extrait de l'environnement et des fonctionnalités du logiciel ELODIE

Fig. II-12 : Interface et fonctionnalités du logiciel EIME pour l'ACV

Fig. II-13 : exemple d'évaluation avec Bilan Produit selon 08 indicateurs (ADEME, 2016)

Fig. II-14 : Vue de l'interface du module SolidWorks Sustainability

Fig. II-15 : Le module Eco Materials Adviser intégré au logiciel Inventor donne la possibilité de calculer les variables d'impacts sur l'environnement d'un produit

Fig. II-16 : Eco-conception avec CES Selector, logiciel d'audit environnemental des projets

Fig. III-1 : Etapes progressives de la démarche ACV

Fig. III-2 : présentation élémentaire des catégories d'impacts et de dommages provenant d'un inventaire du cycle de vie d'un produit quelconque

Fig. III-3 : Chaîne de causalité mettant en exergue le passage d'une émission ou d'un rejet à un impact intermédiaire (Midpoint) puis à un dommage (Endpoint)

Fig. III-4 : Représentation des résultats de l'inventaire du cycle de vie (LCI), des catégories d'impacts intermédiaires (Midpoint) et des catégories de dommages (Endpoint) selon la méthode IMPACT 2002+

Fig. III-5 : Chaîne de cause à effet pour la catégorie écotoxicité

Fig. III-6 : Schéma d'évaluation d'impacts selon la méthode « impact 2002+ »

Fig. IV-1 : Les composants d'un coffret de commande est de protection du système d'éclairage routier

Fig. IV-2: Câblage sous-terrain et aérien pour deux installations d'éclairage public

Fig. IV-3 : Luminaire solaire (à panneau photovoltaïque) ne nécessitant pas de câblage

Fig. : IV-4 : Les composants d'un luminaire solaire isolé

Fig. IV-5 : schéma général du réseau d'éclairage public routier

Fig. IV-6 : lampes à décharge vapeur de sodium SHP

Fig. IV-7 : Structure de base de l'association LED bleue-phosphore et émission de lumière blanche

Fig. IV-8 : Modèles de LED COB et quelques données

Fig. IV-9 : Modèle ballast électronique associé aux lampes 250W HPS

Fig. IV-10 : Driver à courant constant (1500 mA) pour lampe LED de 60 W

Fig. IV-11 : Quantité en g de CO₂ émise pour chaque kWh produit selon différents processus de génération de l'électricité

Fig. IV-12 : Quantité en kilogramme de métal extraite pour chaque kWh d'électricité produit selon les différents processus de génération de l'électricité

Fig. IV-13 : Volume et diversité des déchets de l'éclairage public

Fig. IV-14 : Influence de l'angle d'orientation du flux lumineux sur la rentabilité d'un luminaire

Fig. IV-15 : Une perte de plus de 50% de l'énergie consommée sur les lampadaires en boule dépourvus de réflecteurs

Fig. IV-16 : Angle de tolérance d'orientation d'un luminaire d'éclairage extérieur

Fig. IV-17 : Luminaires à LED 50W, 100W, 150W, 200W, 250W

Fig. IV-18 : Luminaires SHP 250W retenu pour l'ACV

Fig. IV-19 : composants concernés par l'étude ACV comparative dans les cas de lampadaires d'éclairage public conventionnels (SHP) et à LED

Fig. IV-20 : Répartition de l'impact environnemental global par étape du cycle de vie, et comparaison de l'impact environnemental global pour une lampe à incandescence, CFL et LED

Fig. IV-21: Comparaison de l'impact environnemental global d'une lampe à incandescence, CFL et LED par lm.h/w, par mètre carré de surface éclairée au cours d'une heure

Fig. IV-22 : Les impacts environnementaux de production (a) d'un luminaire SHP et (b) d'un luminaire LED.

Fig. IV-23 : Comparaison entre impacts environnementaux des luminaires SHP et LED par kilomètre de route éclairé

Fig. IV-24 : Impacts environnementaux de la fabrication, l'utilisation et la fin de vie pour :
(a) Luminaire SHP utilisant le mix énergétique européen;
(b) Luminaire SHP utilisant l'énergie hydroélectrique;
(c) Luminaire LED utilisant le mix énergétique européen; et
(d) luminaire LED utilisant l'énergie hydroélectrique.

Fig. IV-25 : comparaison de (a) la consommation d'énergie et (b) émission du dioxyde de carbone pour des luminaires CMH (250 w) et LED (180 w) pendant la production et utilisation en éclairage public sous réseau électrique conventionnel.

Fig. IV-26 : Évaluation de l'impact par la méthode du score unique pour les luminaires CMH et LED pendant l'étape de fabrication (a) et à la fois la fabrication et la durée de vie opérationnelle (b) (vue hiérarchique).

Fig. IV-26 bis : Efficacité énergétique et potentiel de réchauffement climatique des deux (02) luminaires

Fig. IV-27 : Principe de la bulle lumineuses et ses paramètres

Fig. IV-27 bis : schéma de fonctionnement opérationnel du système d'éclairage intelligent sur une autoroute

Fig. IV-27 bis: schéma de fonctionnement opérationnel du système d'éclairage intelligent sur une autoroute

Fig. IV-28 : Paramétrage et schéma de fonctionnement opérationnel du système d'éclairage intelligent dans un quartier résidentiel

Fig. IV-29 : Bouquet énergétique de référence (Belge)

Fig. IV-30 : système centralisé de télégestion de l'éclairage public

Fig. IV-31 : Principe de fonctionnement d'un système smart éclairage (Dét. de présence, dimming, gradation, télégest.)

Fig. IV-32 : Evolution de l'économie en consommation annuelle (4376 heures) d'énergie sur un tronçon d'un km d'éclairage public pour différents scénarios en KWh

Fig. IV-33 : Simulation comparative des performance énergétiques et économiques de deux types installations d'éclairage public

Fig. IV-34 : Volume et diversité des déchets de l'éclairage public

Fig. IV-35: Organigramme du processus général de traitement des DEEE

Fig. IV-36 : Devenir du recyclage de plus de 90% du poids de la lampe

Fig. IV-37 : Processus général de traitement des différents types de lampes

Fig. IV-38 : Traitement des lampes en fin de vie

Fig. IV-39 : Composants électroniques d'un luminaire LED 200 Wat – quatre (04) Drivers en recto verso (après enlèvement de l'enrobage)

Fig. IV-40 : Traitement des petits appareils électriques et électroniques dont les ballast électroniques et les driver de luminaires LED

Fig. IV-41 : traitement de fin de vie des plastiques des équipements électriques dont ceux des luminaires,

Liste des abréviations	
Abréviation	Signification
ACV/LCA	Analyse du cycle de vie /Life cycle assessment
AD	Epuisement des ressources non renouvelables ou « Abiotic Depletion »
ADEME	L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ADP	abiotic depletion potential
ADP	Abiotic resources Depletion Potential
AFE	Association Française d'Eclairage
AP	acidification potential
BC	Bilan Carbone
BEE	Bilan Environnemental des Emballages
CAO	Conception Assisté par Ordinateur
CAO	Conception Assisté Par Ordinateur
CAS	CAS-Number : numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de Chemical Abstracts Service
CCP	Coffret de Commande et de Protection
CDR	Carbon Dioxide Removal (Elimination de Dioxyde de Carbone)
CMH	Ceramic Metal Halide/Halogénure Métallique Céramique
CML	Center of Environmental Science
COB	Chip On Board
CoE/DfE	Conception orientée Environnement/Design for Environment
COV	composés organiques volatiles
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (France)
DALY	Année équivalente de vie perdue/Disability Adjusted Life Years
DCB	dichlorobenzène
DCB	Di-Chloro-Benzène
DEEE (D3E)/WEEE	Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques - (en anglais : Wast Electronic and Electrical Equipment – WEEE).
DEPs	Déclarations Environnementales de Produits
DTU	Université Technique Danoise/ Technical University of Denmark
EDIP	Environmental Design of Industrial Products
EE	Empreinte Ecologique
EICV (LCIA)	Évaluation des Impacts du Cycle de Vie
ELCD	base de données européenne de Cycle de Vie
ELCD	European reference Life Cycle Database
EMPA	le laboratoire fédéral suisse d'essai des matériaux et de recherche
EoL	End Of Live (fin de vie)
EP	eutrophication potential
EPA	l'agence de protection de l'environnement américaine
EPFL	l'Institut Fédéral Suisse de Technologie de Lausanne
EPLCA	European Platform on Life Cycle Assessment
EPS	Environmental Priority Strategies in Product Development
ESQCV	évaluation simplifiée et qualitative du cycle de vie
FAETP	Toxicité des écosystèmes aquatiques d'eau douce (freshwater aquatic ecotoxicity potential)
FC	Facteur de Caractérisation
FDES	Fiche de déclaration environnementale et sanitaire

FDES	Fiche de Déclaration environnementale et Sanitaire
FIIEC	Fédération des industries électriques, électroniques et de communication
FPA/PAF	fraction d'espèces Potentiellement Affectées/ Potentially Affected Fraction of species
GEPPADI	Gestion d'Eclairage Public des Parcs d'Activité Durable et Intelligent
GES	Gaz à Effet de Serre
GHG/GES	A greenhouse gas/Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
HID	(High Intensity Discharge)/ décharge à haute intensité
HTP	Potentiel de Toxicité humaine (human toxicity potential)
HTP	facteur de caractérisation potentiel de toxicité humaine
ICPE	installation classée pour la protection de l'environnement
ICV	Inventaire du cycle de vie
InGaN	Indium Gallium Nitride
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRC	Indice de Rendu des Couleurs
ISO	Organisation internationale de normalisation
JRC	Le Centre commun de recherche/Joint Research Centre
JRC	(Joint Research Centre
LED	Diode Electro-Luminescent
LED RVB/RGB	LED Rouge, Vert et Bleu/Red, Green, and Blue
LU	Usage des sols « Land Use »
MAETP	Potentiel Ecotoxicité marine (marine aquatic ecotoxicity potential)
MESOR	Midline Estimating Statistic Of Rythm
MFA	Material Flow Accounting (Analyse des Flux de Substances – SFA)
MFA	Materials Flow Accounting/ Comptabilité des Flux de Matières
MIPS	Material Input Per Service
MIPS	Material Input Per Service unit/les intrants de matières par unité de service
ODP	Potentiel Epuisement de la couche d'ozone (Ozone Depletion Potential)
OMM/WMO	Organisation Météorologique Mondiale
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PA/AP	Potentiel d'acidification/Acidification Potential
PCA	Alumine poly-cristalline
PCA	Alumine Poly-Cristalline
PCS	pouvoir calorifique supérieur
PDF	Fraction d'espèces disparues/Potentially Damage Fraction of species
PE International	Private Equity International
PE/EP	potentiel d'eutrophisation/Eutrophication Potential
PEBDL/LLDPE	Le polyéthylène basse densité linéaire/Linear low-density polyethylene
PEP	Profil Environnemental Produit
PEP/ EPD	Profil Environnemental Produit/ EnvironmentalProductDeclaration
PNEC	pourcentage d'organismes exposé à une concentration plus élevée
PNEE	Programme National d'Efficacité Energétique
POCP	photochemical ozone creation potential
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
PRG/GWP	Potentiel de Réchauffement Mondial ou Global Warming Potential

SHP	sodium à haute pression
SPOLD	(Society for the Promotion of Life Cycle Development)
SPOLD	Society for the Promotion of Life Cycle Development
TETP	terrestrial ecotoxicity potential
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts/Outil pour la réduction et l'évaluation des produits chimiques et d'autres impacts environnementaux).
UF	Unité Fonctionnelle
ULOR	Upward Light Output Ratio
UNEP	United Nation Environmental Programme
UNEP	United Nations Environment Programme : le Programme des Nations Unies pour l'Environnement
YLD	nombre d'années de vie pendant lesquels la santé est affectée/ Years of Life Disability
YLL	Nombre d'années de vie perdus/Years of Life Lost
Quelques Termes utilisés en anglais et leur traduction en français	
Average	Valeur moyenne
Ballast	Transformateur
Capacitor	Condensateur
Cover	Couverture/Couvercle
Driver	Pilote
European	Européen
Hydropower	Hydroélectricité
Lamp	Lampe
LED Array	Circuit LED
Luminaire	Luminaire
Manufacturing	Manufacture/Fabrication/Production
Streetlight	Éclairage routier
Use	Utilisation

Introduction générale

Introduction générale

Les changements climatiques et la dégradation de l'environnement sont devenus une préoccupation majeure de la communauté internationale.

La communauté scientifique et les experts n'ont cessé depuis les années soixante-dix du siècle passé à prévenir les instances nationales et internationales contre les éventuels dangers qui pourraient menacer le sort des espèces faunistiques et floristiques et les ressources naturelles et par conséquent l'humanité toute entière si des mesures adéquates ne seront pas prises.

Les menaces en question proviennent essentiellement de la surconsommation qui va en crescendo faisant constamment appel à davantage de ressources pour subvenir aux besoins croissants de l'homme.

La satisfaction des exigences de consommation a continuellement nécessité le recours à la mise en place de processus de production alimentés par des matières premières et des ressources énergétiques puisées de la nature.

Ce recours à l'extraction des ressources, la transformation et la production de produits finis et semi-finis se fait dans bien des cas au détriment de la préservation d'autres potentialités de la terre.

La conception et la mise en œuvre des processus avait souvent obéi à une logique de productivité et de rentabilité économiques et sans prise en considération des retombées écologiques ou l'optimisation des impacts menant, ainsi, à accélérer la dégradation des ressources.

Les émissions et les déchets, de toute sorte et à tous les niveaux, rejetés de manière chaotique portent la pollution à des niveaux de nuisances insupportables impactant gravement les milieux atmosphériques, aquatiques et terrestres.

Outre l'influence transrégionale de certains polluants et déchets rejetés, les dommages provoqués sont parfois irréversibles et irréparables.

L'inventaire des pertes et des retombées directes et indirectes sont loin d'être cernées de façon exhaustive. Il s'agit entre autres du réchauffement climatique, de la dégradation des écosystèmes et des corridors faunistiques, de la disparition des espèces ...

La prise de conscience manifestée à l'échelle planétaire durant les deux dernières décennies du siècle dernier s'est répercutée sur les politiques environnementales nationales de certains pays ayant opté pour la promulgation de dispositifs législatifs et réglementaires et l'élaboration de plans d'actions visant la limitation de la pollution et la protection de l'environnement.

Introduction générale

Il en est de même pour les aspects normatifs suscitant l'intérêt des organismes de normalisation nationaux et internationaux force est de constater que l'Organisation Internationale de Normalisation et a édité et mis en place à partir de l'année 1994 la première norme ISO portant les exigences des systèmes de management de l'environnement ouvrant la voie à une série de normes convergeant vers les mêmes finalités.

En dépit des avancées réalisées suite aux démarches entreprises à la fin du vingtième siècle sur les plans réglementaires, normatifs et technologiques, les performances environnementales atteintes n'étaient pas en mesure de limiter significativement la cadence des impacts néfastes produits par les processus et les déchets de fin de vie. Certains nouveaux produits et processus de production, vraisemblablement non polluants n'ont, en effet, que déplacer le potentiel de pollution vers l'amont ou l'aval des processus concernés.

L'émergence du concept de durabilité a fait naître une nouvelle approche pour s'y prendre aux problématiques écologiques et imposer un changement de paradigme quant à la perception de la performance environnementale.

La prise de conscience accrue de l'importance de la protection de l'environnement et des impacts possibles associés aux produits tant fabriqués que consommés a augmenté l'intérêt pour le développement de méthodes destinées à mieux comprendre et à remédier à ces impacts [1].

Dans l'optique de cette dynamique impulsée par des instances internationales et nationales, l'ISO a prêté son concours pour répondre aux enjeux du changement climatique avec ses normes pour la quantification, la vérification des extrants à effet de serre ainsi que pour les méthodes d'évaluation et de mesure de l'empreinte carbone des produits et processus, ainsi elle a élaboré, de manière intensive, des documents normatifs pour converger voire fusionner des objectifs commerciaux avec ceux environnementaux en encourageant la prise en compte des aspects écologiques dans la conception des produits. Le concept d'écoconception a été progressivement mis en évidence.

A ce titre, il s'agissait de faire acquérir, à tous les acteurs des activités économiques, une prise de conscience pour le déploiement de démarches proactives consistant à anticiper sur les dommages et nuisances qui pourraient se produire durant l'ensemble du cycle de vie, à savoir : de l'acquisition des matières premières, à la production, au transport, à l'utilisation et au traitement des matières, matériaux, produits et articles en fin de vie.

Ainsi la série des normes 14000 a été largement étoffée par une trentaine de normes telles, l'ISO 14040, l'ISO 14044, l'ISO 14062... qui servent actuellement dans plusieurs pays préoccupés par les répercussions sur l'environnement comme base technique à l'élaboration et l'enrichissement des

Introduction générale

règlements y afférents [2]. En outre, cette palette de normes, constitue une référence de bonnes pratiques transversales aux entreprises, tous secteurs d'activité confondu.

Nonobstant les dispositions de la panoplie des normes de la famille 14000, la norme ISO 14044 intitulée « Management environnemental- Analyse du Cycle de Vie - exigences et lignes directrices » est venue fournir des pratiques d'évaluation, de scoring et d'identification des possibilités d'amélioration des performances environnementales des produits et des services à différentes étapes de leur cycle de vie.

La publication des normes relatives à l'éco-conception et à l'analyse du cycle de vie est venue couronner l'engagement de la communauté internationale représentée par l'ISO quant à réaliser les objectifs du « développement durable » formulés à la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, à Rio de Janeiro.

La présente thèse recourt au déploiement des dispositions de ladite norme (ISO 14044) et les autres normes qui en dépendent comme cadre méthodologique à l'effet d'étudier et d'examiner, à titre comparatif, les impacts environnementaux de systèmes d'éclairage public conventionnels et d'un système d'éclairage au LED. Le but étant de cerner les conséquences environnementales des émissions dues aux différentes étapes du cycle de vie, d'établir un score unique propre à chaque système, en faveur d'une prise de décision éclairée et d'en arriver à suggérer des scénarios d'optimisation.

Les objectifs prévus à travers cette étude consistent à :

- Evaluer les performances environnementales, énergétiques et économiques de chaque système d'éclairage public;
- Mettre à la disposition des décideurs, des professionnels et des autres parties intéressées dans le domaine de l'éclairage public des informations fortement utiles pour des actions de planification stratégique, d'établissement de priorités et de conception en cohérence avec les exigences et caractéristiques villes durables et/ou des Smart cités.
- Fournir un cadre méthodologique pour le déploiement et l'utilisation de la norme pour examiner des processus et des produits similaires notamment à l'occasion de maturation de projets d'envergure national, régional ou de collectivités.

Par ailleurs, le recours à l'exploitation approfondie des références bibliographiques, études et projets réalisées par les scientifiques et/ou les professionnels du monde dans ce domaine moyennant des bases de données et des logiciels de simulation reconnus pour leur robustesse constitue une piste essentielle pour l'atteinte des objectifs, cités supra.

Introduction générale

Outre la recherche sur le réseau Internet, des centaines d'articles et d'ouvrages scientifiques sélectionnés, des ressources et des guides professionnelles et techniques éditées par des organismes et des institutions reconnues pour leur expertise et leur crédibilité ont servi de manière substantielle pour la collecte de données et de résultats consignés sur la présente étude et ce après traitement, vérification, comparaison, recoupement et validation.

La présente thèse a été structurée en quatre (04) axes principaux, à savoir :

- Le concept d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) ;
- Les méthodes, bases de données et logiciels d'ACV ;
- Les catégories d'impacts environnementaux et leurs modes de calcul et d'agrégation ;
- L'analyse comparative des systèmes d'éclairage public et les voies d'optimisation de leurs performances environnementales

La matière fournie à travers les différents chapitres de cette étude s'est, également, étoffée grâce à des travaux menés durant le parcours de doctorant en faisant l'objet de moult présentations, communications et publications via des tribunes et des manifestations scientifiques et académiques nationales et internationales.

Positionnement du projet de recherche

La réduction de l'intensité des émissions des gaz à effet de serre et l'augmentation de l'efficacité énergétiques se trouvent parmi les réponses préconisées par la communauté internationale pour face aux défis environnementaux. Le thème de cette thèse cadre parfaitement avec ces préconisations et viendra ajouter une pierre à l'édifice du développement durable.

Le sujet de recherche de cette thèse relève, également, des domaines d'intérêt de la structure de son rattachement, en l'occurrence, le Laboratoire de Recherche en Technologie Alimentaire – LRTA relevant de la Faculté de Technologie de l'Université de Boumerdes ayant pour vocation, entre autres, la mise en place des méthodologies de déploiement du Développement Durable et la performance environnementale à différentes échelles.

Dans ce cadre, l'ACV apparaît comme un outil d'importance pour l'évaluation environnementale compatible avec les diverses activités industrielles et de services et ce en faveur de l'accompagnement de la dynamique insufflée par les pouvoirs publics au titre de l'adhésion et la ratification de notre Pays de l'ensemble des conventions, accords et traités internationaux liés au

Introduction générale

l'environnement et au climat, tels ses engagements en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

En dépit de son traitement de manière restreinte à l'échelle mondiale, l'application de l'ACV au domaine de l'éclairage public reste un sujet d'une nouveauté absolue en Algérie. La multiplication des initiatives dans ce domaine aurait des répercussions positives pour la recherche appliquée.

La vulgarisation, l'encouragement et l'intensification des études ACV à l'échelle des instances académiques, des centres de recherche, des bureaux d'études et des entreprises contribuent sans nul doute à renforcer le capital d'expertise nationale dans ce domaine et ainsi permettrait d'anticiper sur la compétitivité économique et les éventuels durcissements de la législation nationale et internationale.

Aussi, il convient de préciser que le contenu de cette étude vient s'inscrire en droite ligne avec les préoccupations nationales formalisées dans le Programme Nationale des Energies Renouvelables et l'Efficacité Energétique ainsi que le Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable et le Plan National Climat.

Chapitre I
LES ENJEUX
ENVIRONNEMENTAUX,
OUTILS D'ANALYSE ET
L'ACV

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET LE CONCEPT ACV

1. LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Le rythme des changements de l'environnement s'est accru à une allure exponentielle provoquant l'épuisement accéléré des ressources, la dégradation des écosystèmes et des changements climatiques engendrant le réchauffement de la terre.

Ce réchauffement a déjà engendré plusieurs conséquences majeures telle l'augmentation du niveau des mers d'environ trois (03) mm par an. Ce phénomène est le résultat de la dilatation des océans dû à leur réchauffement ainsi qu'à la fonte des glaces particulièrement celles du Groenland, de l'Arctique, et de l'Antarctique.

Le climat ne fait pas que se réchauffer, il est aussi en changement. Ainsi, les régions sèches deviennent généralement encore plus sèches et les zones humides encore plus humides [3]. Par ailleurs, il existe une augmentation des événements climatiques extrêmes tels que les inondations, les fortes tempêtes de pluies, les ouragans, les vagues de chaleur et les sécheresses suivies de feux de forêts réduisant continuellement la biodiversité de la faune et la flore.

Les modèles du Groupe d'Experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat - GIEC

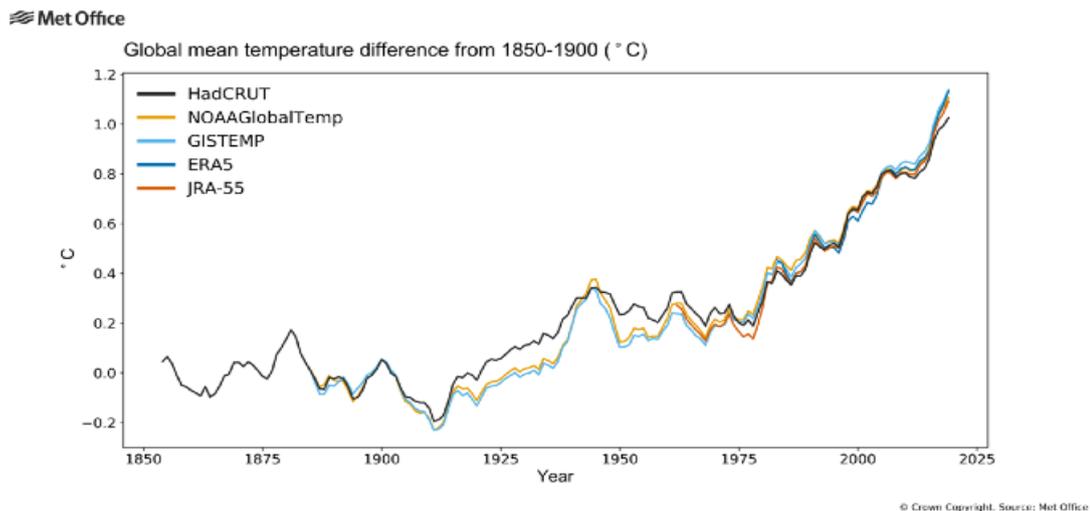


Fig. I-1 : Evolution de la température moyenne de la terre depuis de 1850 à 2025
Source : <https://www.metoffice.gov.uk/about-us/press-office/news/weather-and-climate/2020/hadcrut5-announcement>

prédisent aujourd'hui un risque élevé d'événements climatiques extrêmes à partir de 1,5 °C de réchauffement [4], alors qu'en 2001 les modèles prédisaient les mêmes risques à partir de 3 ou 4 °C [5]

La pollution de toute nature et des événements climatiques extrêmes pourraient avoir des retombées graves sur les écosystèmes et la biodiversité comme prévoit la simulation et l'illustration, ci-dessous.

1.1. Empreinte écologique de l'humanité :

La modification constatée des écosystèmes est, en partie, due au changement naturel du climat, mais elle est majoritairement liée aux activités humaines (anthropiques) réalisées pour subvenir aux



Fig. I-2 : Les inondations de 2021 et 2022, un exemple d'événements climatiques extrêmes

besoins de consommation qui vont en crescendo. Parmi elles, la surconsommation de l'eau, l'exploitation accélérée des ressources naturelles, l'extraction des énergies fossiles (non renouvelables, la déforestation, la pollution des eaux, des sols et de l'air, la diminution des terres disponibles pour permettre aux écosystèmes de subsister, l'accumulation de déchets, l'extension

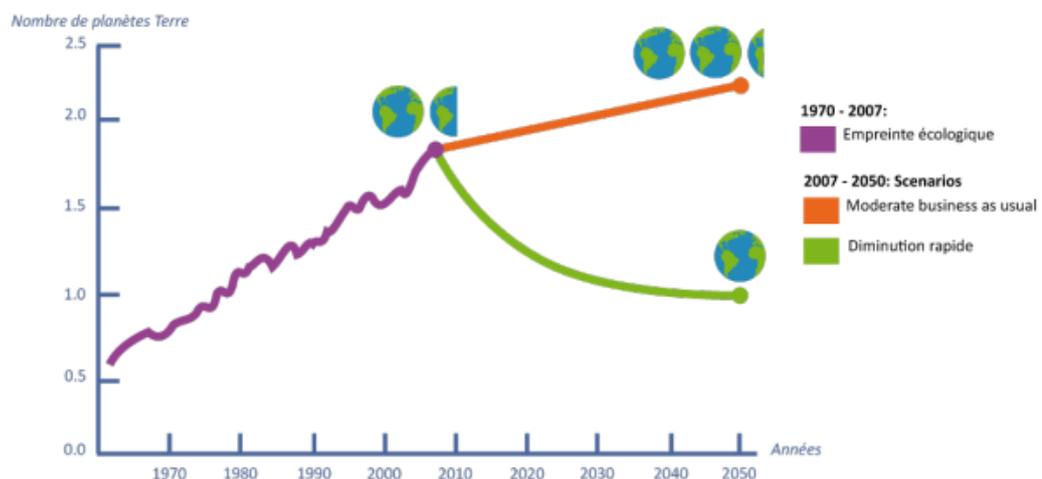


Fig. I-3 : Evolution de l'empreinte écologique de l'humanité.
Source : http://acvbat.univ-valenciennes.fr/chap02/co/ch02_300_2-2-2.html

urbanistique, les autoroutes et les réseaux d'éclairage public...

Entre 1961 et 2014, l'empreinte écologique est passée de 0,73 à 1,69 fois la biocapacité de la planète, soit une croissance de 1,57% par an [6]. Au rythme actuel de consommation, l'humanité requiert 1,7 planète Terre, et ce chiffre est en constante augmentation. Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) représentent 60% de l'empreinte écologique de l'humanité [7] (cf. Fig. I- 3).

1.2.Dégradation de la Biodiversité :

Dès la dernière décennie du vingtième siècle et le début du vingt-et-unième siècle, l'Humanité vivait déjà à crédit, car elle ne laisse pas aux écosystèmes le temps de se régénérer, ce qui provoque leur déperdition voire l'extinction définitive de certaines espèces (fig I-4).

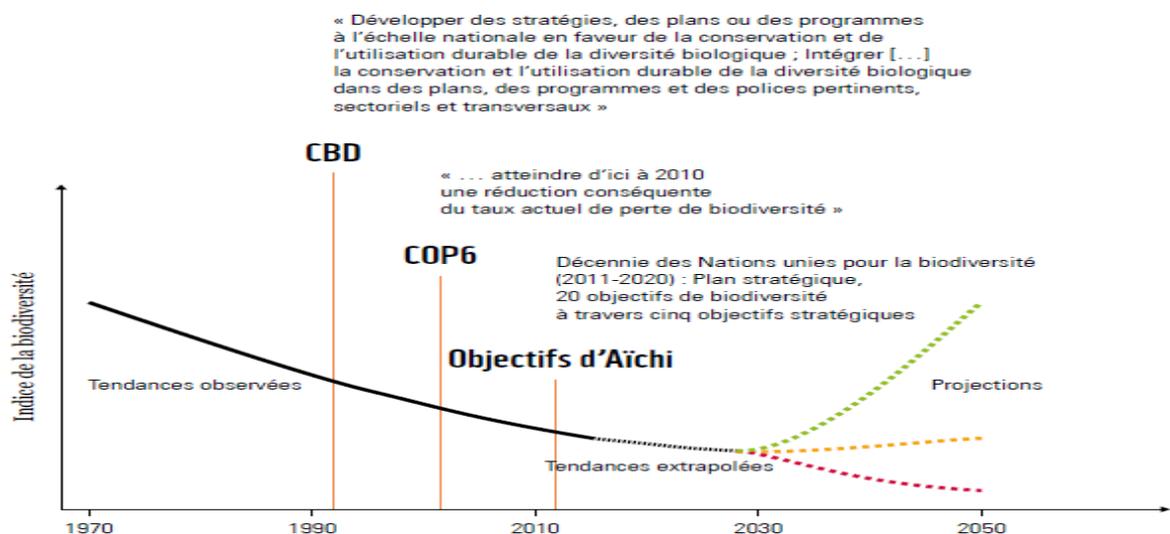


Fig. I-4 : Déclin de la biodiversité et les scénarios prévus après 2030 [142]

CDB : Convention de la Diversité Biologique (1992), **COP6** : Conférences des Nations Unies sur les changements climatiques (La Haye, 2000), **Objectifs d'Aïchi** : Plan Stratégique pour la Diversité Biologique 2011-2020 pour la planète, adopté par les Parties à la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) en octobre 2010 à Aïchi au Japon.

Sur le graphique de la figure I-4 est représenté l'évolution de la biodiversité, nous relevons que la courbe noire indique les tendances observées jusqu'au en 2015, la courbe en pointillés exprime les extrapolations qui peuvent naître des tendances observées avec différents scénarios à partir de 2030 selon que la biodiversité continue à décliner (courbe rouge), qu'elle se stabilise (jaune) ou qu'elle se régénère (verte) [8].

1.3.Épuisement des ressources naturelles

Un des problématiques environnementales majeures, caractérisant notre ère, est l'épuisement des ressources naturelles. Sans l'utilisation de ces ressources, il est impossible pour l'humanité de maintenir les niveaux de consommation actuels et du coup les quantités de métaux extraites des sols continuent d'augmenter. Les sociétés humaines sont ainsi mises en danger quand des ressources naturelles importantes viennent à manquer. A l'état actuel des estimations des réserves, plusieurs ressources importantes sont proches à des niveaux critiques alertant de leur épuisement.

Les estimations de certaines réserves en ressources naturelles sont toujours hasardeuses, car de nouvelles pourraient être découvertes et de nouvelles techniques d'extraction pourraient voir le jour [9]. Toutefois, selon les dernières estimations, sur les soixante (60) métaux présents sur Terre, une dizaine d'entre eux devraient être épuisés dans une ou deux générations si nous continuons au rythme actuel d'extraction [10], et ce nombre monte à au moins une vingtaine si la croissance de l'extraction de ces métaux continue au rythme actuel (cf. Tableau I-1).

Tab. I-1 : Estimation des durées d'épuisement des réserves si les taux de croissance de la production continuent aux rythmes des vingt dernières années [143] [144]

Épuisement à court terme (moins de 30 ans)	Épuisement à moyen terme (moins de 50 ans)
Antimoine	Manganèse
Strontium	Nickel
Étain	Cuivre
Argent	Sélénium
Cobalt	Niobium
Or	Molybdène
Zinc	Lithium
Plomb	Bore
Bismuth	Yttrium
Chrome	Tungstène
Indium	Gallium
Germanium	
Tantale	
Zirconium	

De plus, parmi les réserves de métaux prises en compte, la rentabilité de la production de certains parmi eux est actuellement compromise [10].

1.4. Epuisement de ressources énergétiques des matières premières :

Les sources non renouvelables d'énergie sont également assez proches de l'épuisement. Les réserves mondiales prouvées et restant utilisables aux conditions économiques et technologiques

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

actuelles de pétrole, gaz naturel, nucléaire et charbon sont estimées, respectivement, pour des durées de 50, 51, 90 et 132 ans [11]. En tout, ces 4 ressources combinées représentent 91 ans de consommation d'énergie au rythme actuel.

D'autres ressources sont également proches de l'épuisement. Parmi elles, le phosphate [12], les terres exploitables, l'eau potable ou encore le sable nécessaire à la production du béton [13].

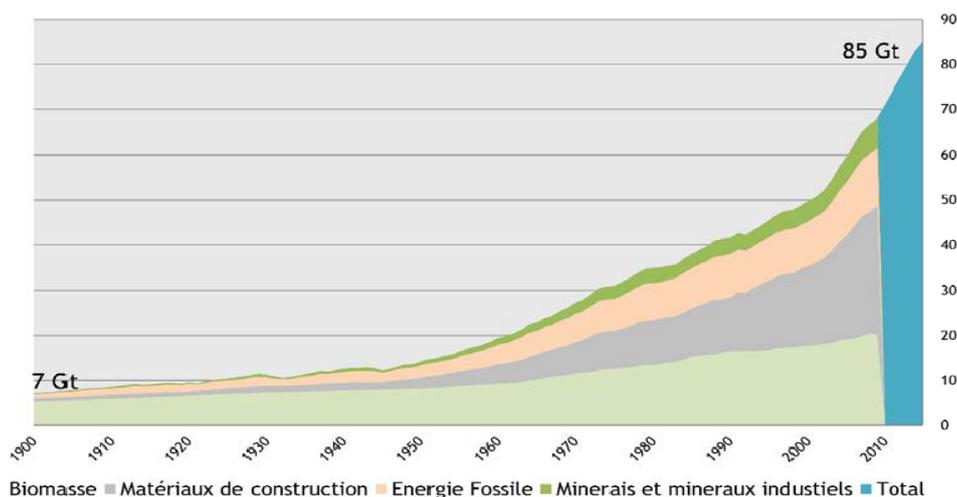


Fig. I-5 : Evolution de la consommation des matières premières Geldron (2018, p.6)/

2. RÉPONSE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX :

Pour faire face à ces défis environnementaux, quatre approches technologiques envisagées pour rester sous les 1,5 ou 2 °C du réchauffement de la Terre. La première consiste à émettre moins de GES pour produire la même quantité d'énergie. On parle dans ce cas de la réduction de l'intensité d'émission. La deuxième consiste à réduire la quantité d'énergie nécessaire à la réalisation d'une activité ou la fourniture d'un service. On parle alors d'une augmentation de l'efficacité énergétique ou l'augmentation de l'efficacité énergétique. La troisième consiste à enlever des GES de l'atmosphère, et la dernière à modifier le climat pour baisser la température globale de la Terre. La faisabilité de ces réponses est un sujet de débat dans les milieux spécialisés.

2.1. Réduction de l'intensité d'émission

La première méthode consiste à élaborer des technologies permettant de réduire la quantité de GES émise pour produire la même quantité d'énergie. Plusieurs d'entre elles ont été mises au point ces dernières décennies, notamment l'énergie solaire, éolienne ou encore nucléaire. Elles émettent en effet plusieurs dizaines de fois moins de GES sur l'ensemble de leurs cycles de vie que les énergies fossiles pour produire de l'électricité.

Ces différentes technologies à faible intensité carbone peuvent donc réduire drastiquement les émissions de GES humaines sans pour autant réduire la consommation énergétique mondiale.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (2018), l'électricité mondiale est encore pour les deux tiers produite à partir d'énergies fossiles ce qui lui donne la part du lion en matière d'émission des GES. Les réductions de l'intensité carbone sont notamment dues à l'augmentation de l'efficacité énergétique, d'autres secteurs, considérés comme des gros émetteurs, pourraient contribuer à la réduction des émissions de GES en optant pour l'optimisation et l'amélioration de leur efficacité énergétique.

Une partie de cette étude s'inscrit pleinement dans cet axe de réponses aux défis environnementaux.

2.2. Augmentation de l'efficacité énergétique

Des évolutions technologiques peuvent permettre de diminuer l'énergie nécessaire à la réalisation d'une action ou d'un processus, impliquant ainsi une diminution des quantités de GES émis. Il s'agit donc d'une méthode importante dans la lutte contre le changement climatique.

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

Les technologies en question tournent généralement autour de la réduction de la quantité de ressources nécessaires à la réalisation d'une même action. Dans ce cas, on parle de l'augmentation de l'efficacité en cette ressource. Les innovations technologiques favorisant le réemploi, le partage, la réparation, la rénovation, le reconditionnement et le recyclage sont préconisées et font partie de «L'économie circulaire» [14].

Les gains en matière d'efficacité énergétique s'étale à plusieurs secteurs. Il s'agit par exemple de l'isolation des bâtiments permettant de diminuer la quantité de chauffage nécessaire, des appareils ménagers optimisés qui consomment moins d'électricité, des avions et des autres moyens de transport qui ont doublé leur efficacité énergétique depuis 1970 [15].

La miniaturisation continue des composants électroniques et informatiques laisse les appareils numériques de moins en moins énergivores. Entre 1945 et 2010, la réalisation de la même action numérique demande deux fois moins d'énergie tous les 19 mois [16].

Des améliorations de l'efficacité énergétique continueront de se produire grâce aux smart-technologies qui se généralisent progressivement dans les usages domestiques et professionnels. Le potentiel offert par le numérique pourrait grandement augmenter l'efficacité énergétique et mener à une réduction de 20% des émissions de GES mondiales d'ici 2030.

Les progrès de la technologie automobile a permis, en sus de l'obtention des performances énergétiques, de diminuer le nombre d'accidents, fluidifier la conduite, permettant, ainsi, de garder les véhicules plus longtemps et réduire considérablement les déchets [17].

Une partie de cette étude s'inscrit pleinement dans cet axe de réponses aux défis environnementaux

2.3.Enlèvement du dioxyde de carbone

Le principe de cette méthode est de capter une partie du dioxyde de carbone contenu dans l'air pour ensuite le stocker ou le réutiliser de telle sorte qu'il n'accroisse pas l'effet de serre, et ne participe donc pas au réchauffement climatique. Sachant que le CO₂ représente 82% des émissions humaines de GES au cours de ces dernières années [18].

Les méthodes et technologies de captage ont un fort potentiel et y sont regroupées sous l'appellation CDR, pour « Carbon Dioxide Removal ». Elles sont fortement prônées par le GIEC (2018). La majorité des scénarios envisagés pour rester sous les barres des 1,5 ou 2°C prennent en compte ces technologies. Les scénarios du GIEC donnant 66% de probabilité de rester sous les 1,5°C

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

comprennent l'enlèvement d'entre 100 et 1000 milliards de tonnes (Gt) de CO₂ de l'atmosphère d'ici 2100 [18], ce qui dénote l'importance de ces technologies.

Il existe plusieurs types de CDR, dépendant de la manière de capter, de stocker et/ou d'utiliser le CO₂.

La technique de stockage qui consiste à enfouir le gaz dans des poches rocheuses souterraines ayant permis la formation du pétrole et du gaz naturel est la plus préconisée.

Les précédentes techniques d'enlèvement du carbone et de son stockage ou de son utilisation peuvent parfois être couplées à d'autres techniques pour augmenter leurs performances [19]. Telle la plantation d'arbres conjuguée à la production de biocarburants et les technologies de captage et de stockage du carbone.

Dans le cadre de cette approche, certaines études estiment que la plantation de forêts sur toutes les terres inoccupées au niveau mondial pourrait permettre d'éliminer environ 205 Gt de CO₂ de l'atmosphère, soit l'équivalent d'environ quatre (04) ans d'émissions de GES au rythme actuel [20].

Le GIEC considère ce procédé pourrait permettre de réduire les émissions de GES de l'atmosphère, d'ici 2100, jusqu'à 22,5 Gt de CO₂ par an [21], sachant que le Monde en a émis 55,3 Gt en 2018 [22].

D'autres techniques pourraient rendre encore plus efficaces les techniques d'enlèvement du dioxyde de carbone et endiguer le réchauffement de la Terre, telles les modifications génétiques des plantes (maïs, soja, riz, blé, coton et colza...) leur permettant de capter une plus grande quantité de CO₂ [23].

2.4.Modification du climat :

Végétaliser les villes, peindre les routes et les toits en blanc, ensemercer les nuages, fertiliser les océans, simuler un volcan géant, installer un parasol géant dans l'espace... sont entre autres des idées qui en majorité ne font pas consensus auprès de la communauté scientifique au regard des doutes entourant leur faisabilité, leur coût, leur répercussions et leurs performances.

Indépendamment des entreprises évoquées, ci-dessus, les alternatives à concevoir devront provoquer un changement de paradigme radical telle la réduction du flux de matières, l'allocation

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

raisonnable de ressources, l'éco-conception, le soin des écosystèmes et ce à l'effet de permettre à l'Humanité de vivre de manière durable sur Terre.

Le volet éducatif et formation joue un rôle pivot pour sensibiliser sur les défauts et les retombés des systèmes actuels ainsi que la création d'une conscience collective quant à vivre dans une société en accord avec les limites environnementales de la planète. Les générations futures devront être plus conscientes et plus responsables des enjeux environnementaux du moins ceux évoqués, ci-dessus.

L'approche holistique portant analyse environnementale et durable du cycle de vie des processus de production des biens et des services est devenue aujourd'hui une piste qui suscite un large consensus quant à son pouvoir d'identification, au préalable surtout, des potentialités et des performances optimales sur le plan énergétique et environnemental.

Le chapitre qui suit aborde les concepts et aspects liés à l'approche de l'Analyse du Cycle de Vie et constitue un soubassement théorique aux travaux de cette étude repris eux aussi dans les chapitres ultérieurs.

3. PRESENTATION DE LA METHODE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

3.1. Le concept d'analyse du cycle de vie:

L'émergence du concept d'analyse du cycle de vie dans le domaine de l'environnement est le fruit d'un cumul de savoirs et d'expériences capitalisés depuis les années soixante-dix du siècle passé à travers les efforts des scientifiques, des professionnels et des politiques dans le domaine de la lutte contre la pollution et la protection de l'environnement. Il s'agit d'un retour d'expérience et de l'apprentissage à travers des bonnes pratiques précédemment déployées.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode normalisée, quantitative, multi-étapes et multicritères permettant de quantifier les impacts environnementaux et d'apprécier la qualité environnementale d'un ouvrage, produit ou service sur la totalité de son Cycle de Vie. L'ACV se révèle être un outil pertinent au service des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, chargés de l'organisation et des méthodes, ingénieurs, techniciens et architectes œuvrant pour concevoir, sélectionner et optimiser des solutions respectueuses du principe du développement durable par l'identification et l'évaluation des aspects environnementaux «du berceau à la tombe» [24].

Les définitions, ci-dessous, constitue les fondements de ce concept méthodologique.

3.1.1. Cycle de Vie :

Il s'agit pour un produit ou un service de l'ensemble des étapes consécutives et liées, de la préparation, l'acquisition des matières premières ou de leur génération à partir de ressources naturelles jusqu'à l'élimination finale en passant par les étapes successives de sa production/fabrication, transport, utilisation, maintenance...

3.1.2. Analyse du Cycle de Vie – ACV :

compilation et évaluation méthodologique des impacts environnementaux potentiels des intrants, des extrants d'un système de produits au cours de son cycle de vie

3.1.3. Inventaire du Cycle de Vie – ICV :

phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des intrants et des extrants, pour un système de produits donné au cours des étapes son cycle de vie.

3.1.4. Evaluation de l'Impact du Cycle de Vie – EICV:

phase de l'analyse du cycle de vie destinée à comprendre et à évaluer l'ampleur et l'importance des impacts potentiels d'un système de produits sur l'environnement au cours de son cycle de vie.

3.1.5. Interprétation du cycle de vie :

phase de l'analyse du cycle de vie au cours de laquelle les résultats de l'analyse de l'inventaire ou de l'évaluation de l'impact, ou des deux, sont évalués en relation avec les objectifs et le champ définis pour l'étude afin de dégager des conclusions et des recommandations.

3.1.6. Aspect environnemental :

élément des activités, produits ou services d'un organisme susceptible d'interactions avec l'environnement

L'Analyse du Cycle de Vie est une méthodologie cadrée par la norme ISO 14044 fixant les exigences, les lignes directrices et faisant partie, ainsi, de la panoplie des normes ISO 14000 dont l'objet principal est le traitement des aspects environnementaux dans leurs diverses dimensions.

3.2. La famille des normes ISO 14000

La famille des normes ISO 14000 constitue un cadre de référence pour le management environnemental, elle a été lancée pour servir de boîte à outils pratiques permettant d'aider à la mise en œuvre d'actions à l'appui du développement durable et de lutte contre les agressions contre l'environnement

La famille des normes ISO 14000 reflète un consensus international sur la maturité des bonnes pratiques environnementales et les bonnes pratiques économiques qui peuvent être appliquées par les entreprises du monde entier dans leur contexte spécifique.

Les normes ISO 14000 sont conçues pour être complémentaires entre elles et avec d'autres normes ISO notamment celles relatives aux systèmes de management (Qualité, Energie, Santé et Sécurité...), mais elles peuvent également être utilisées seules pour atteindre des objectifs spécifiques concernant l'environnement. Elle fournit, entre autres, le cadre organisationnel et les outils de management pour permettre aux organisations de gérer leurs aspects environnementaux et d'évaluer leurs performances environnementales. Ensemble, ces outils présentent des avantages économiques très concrets :

- Optimisation de l'utilisation de matières premières et de ressources ;
- Réduction de la consommation d'énergie ;
- Amélioration de l'efficacité des processus ;
- Réduction des déchets et des coûts de leur traitement ;
- Utilisation de ressources renouvelables.

Ces avantages économiques vont de pair avec des avantages environnementaux précis.

La liste des normes de la série ISO 14000, ci-dessus, ne cessent de s'élargir pour couvrir et régir tout aspect environnemental.

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

- **ISO 14001** Systèmes de management environnemental - Exigences avec lignes directrices pour l'utilisation
- **ISO 14004** Systèmes de management environnemental - Lignes directrices générales pour la mise en œuvre
- **ISO 14005** Systèmes de management environnemental - Lignes directrices pour une approche flexible de la mise en œuvre progressive
- **ISO 14006** Systèmes de management environnemental - Lignes directrices pour l'intégration de l'écoconception
- **ISO 14015** Management environnemental - Évaluation environnementale des sites et des organisations (EASO)
- **ISO 14020 à 14025** Labels et déclarations environnementales
- **ISO/NP 14030** Obligations vertes -- Performance environnementale des projets et actifs nominés ; discute de l'évaluation environnementale post-production
- **ISO 14031 : 2021** Management environnemental - Évaluation de la performance environnementale - Lignes directrices
- **ISO 14040 à 14049** Management environnemental - Analyse du cycle de vie ; discute de la planification préalable à la production et de l'établissement d'objectifs environnementaux
- **ISO 14044:2006** : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices ;
- **ISO 14048** portant « Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Format de documentation de données »
- **ISO 14050** Management environnemental - Vocabulaire ; Termes et définitions
- **ISO/TR 14062** Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits
- **ISO 14063** Management environnemental - Communication environnementale - Lignes directrices et exemples

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

- **ISO 14064** Gaz à effet de serre ; mesurer, quantifier et réduire les émissions de gaz à effet de serre
- **ISO 14090** Adaptation au changement climatique — Principes, exigences et lignes directrices

Le tableau I-2 classe, positionne et répartit les normes de la famille ISO 14000 en fonction de leur apport aux quatre niveaux de la Roue de DEMING ou Cycle d'Amélioration Continue - PDCA (Plan-Do-Check-Act).

Tab. I-2 : Compendium des normes ISO 14000 et leur positionnement sur le cycle de l'amélioration continue (PDCA) Source : Organisation Internationale de Normalisation (ISO)			
Planifier (Plan)	Faire (Do)	Vérifier (Check)	Agir (Act)
<ul style="list-style-type: none"> • Établir les objectifs et les processus requis ; • Mise en œuvre du système de management environnemental 	<ul style="list-style-type: none"> • Mettre en œuvre les processus ; • Conduite de l'analyse du cycle de vie et gestion des aspects environnementaux 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesurer et surveiller les processus et rapporter les résultats • Conduite des audits et évaluation de la performance environnementale 	<ul style="list-style-type: none"> • Prendre des mesures pour améliorer les performances du SME en fonction des résultats • Communiquer et utiliser les déclarations et prétentions environnementales
ISO 14050:2009 Management environnemental – Vocabulaire	ISO 14040:2006 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre	ISO 14015:2001 Management environnemental – Évaluation environnementale de sites et d'organismes	ISO 14020:2000 Étiquettes et déclarations environnementales
ISO 14001:2015 Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation	ISO 14044:2006 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices	ISO 14031:2021 Management environnemental – Évaluation de la performance environnementale – Lignes directrices	ISO 14021:1999 Marquage et déclarations environnementaux – Autodéclarations environnementales (Étiquetage de type II)

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

<p>ISO 14004:2004 Systèmes de management environnemental – Lignes directrices générales concernant les principes, les systèmes et les techniques de mise en œuvre</p>	<p>ISO/TR 14047:2003 Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à des situations d'évaluation de l'impact du cycle de vie</p>	<p>ISO 19011:2002 Lignes directrices pour l'audit environnemental – Procédures d'audit – Audit des systèmes de management environnemental</p>	<p>ISO 14024:1999 Marquage et déclarations environnementaux – Étiquetage environnemental de type I – Principes et méthodes</p>
<p>ISO/DIS 14005 Systèmes de management environnemental – Lignes directrices</p>	<p>ISO/TS 14048:2002 Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Format de documentation de données</p>		<p>ISO 14025:2006 Marquages et déclarations environnementaux – Déclarations environnementales de Type III – Principes et modes opératoires</p> <p>ISO 14026:2017 Déclarations et étiquettes environnementales — Principes, exigences et lignes directrices pour la communication des informations d'empreinte</p>
			<p>ISO/AWI 14033 Management environnemental – Informations environnementales quantitatives – Lignes directrices et exemples</p>
<p><i>Concerne les aspects environnementaux dans les produits et les normes de produit</i></p>		<p><i>Évaluer les résultats relatifs aux gaz à effet de serre</i></p>	

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

<p>ISO 14064-1:2006 Gaz à effet de serre – Partie 1 : Spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre</p>	<p>ISO/TR 14049:2000 Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à la définition de l'objectif et du champ d'étude et à l'analyse de l'inventaire</p>	<p>ISO 14064-3:2006 Gaz à effet de serre – Partie 3 : Spécifications et lignes directrices pour la validation et la vérification des déclarations des gaz à effet de serre</p>	<p>ISO 14063:2006 Management environne- mental – Communication environnementale – Lignes directrices et exemples</p>
<p>ISO/CD 14006 Systèmes de management envi- ronnemental – Lignes directrices sur l'éco- conception</p>	<p>ISO/CD 14051 Management environnemental – Comptabilité du coût du flux de matériel – principes et cadre général</p>	<p>ISO 14065:2007 Gaz à effet de serre – Exigences pour les organismes fournissant des validations et des vérifications des gaz à effet de serre en vue de l'accréditation ou d'autres formes de reconnaissance</p>	
	<p>ISO/WD 14045 Evaluation d'efficacité écologique – Principes et exigences</p>		
	<p><i>Gestion des gaz à effet de serre</i></p>		
<p>ISO/TR 14062:2002 Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit</p>	<p>ISO 14064-1:2006 Gaz à effet de serre – Partie 1 : Spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre</p>	<p>ISO/CD 14066 Exigences de compétence pour le document des validateurs et des vérificateurs de gaz à effet de serre</p>	
	<p>ISO 14064-2:2006</p>	<p>ISO/TS 14071</p>	

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

	<p>Gaz à effet de serre – Partie 2 : Spécifications et lignes directrices, au niveau des projets, pour la quantification, la surveillance et la déclaration des réductions d'émissions ou d'accroissements de suppressions des gaz à effet de serre</p>	<p>Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Processus de revue critique et compétences des vérificateurs: exigences et lignes directrices supplémentaires à l'ISO 14044:2006</p>	
	<p>ISO/TS 14067 Gaz à effet de serre — Empreinte carbone des produits — Exigences et lignes directrices pour la quantification et la communication</p>		
	<p>ISO/WD 14067-1 Empreinte carbone des produits – Partie 1 : Quantification</p> <p>ISO/WD 14067-2 Empreinte carbone des produits – Partie 2 : Communication</p>		
	<p>ISO/AWI 14069 Gaz à effet de serre (GES) – Quantification et rapport des GES pour les organisations (empreinte carbone des organisations) – Directives d'application de l'ISO 14064-1</p>		
	<p>Empreinte eau</p>		

	<p style="text-align: center;">ISO 14046</p> <p>Management - environnemental</p> <p>Empreinte eau -Principes, exigences et lignes directrices</p>		
<p>Sigles : DIS (<i>Projet de Norme internationale</i>); TR (<i>Rapport technique</i>); TS (<i>Spécification Technique</i>) ; AWI (<i>projet approuvé</i>) ; WD (<i>Projet de travail</i>); CD (<i>Projet de comité</i>);</p>			

3.3. Les normes ISO 14040 et ISO 14044

Pour garantir la comparabilité des analyses du cycle de vie, l'Organisation internationale de normalisation a élaboré deux normes complémentaires :

- ISO 14040:2006 spécifie les principes et le cadre applicables à la réalisation d'analyses du cycle de vie comprenant: la définition des objectifs et du domaine d'application d'ACV, la phase d'inventaire du cycle de vie, la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie, la phase d'interprétation du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'analyse du cycle de vie, les limitations de l'analyse du cycle de vie, la relation entre les phases de l'analyse du cycle de vie et les conditions d'utilisation des choix de valeurs et des éléments facultatifs.

L'ISO 14040:2006 traite des études d'analyse du cycle de vie et des études d'inventaire du cycle de vie. Elle ne décrit pas en détail la technique de l'analyse du cycle de vie, ni les méthodologies spécifiques de chacune de ses phases.

L'application envisagée pour les résultats de l'ACV ou de l'ICV soit prise en considération lors de la définition des objectifs et du domaine d'application. En revanche, l'application en tant que telle se situe en dehors du domaine d'application de cette norme internationale.

- L'ISO 14044:2006 spécifie les exigences et fournit les lignes directrices pour la réalisation d'analyses du cycle de vie (ACV) comprenant: la définition des objectifs et du champ de l'étude, la phase d'inventaire du cycle de vie, la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie, la phase d'interprétation du cycle de vie, la communication et la revue critique de l'analyse du cycle de vie, les limitations de l'analyse du cycle de vie, la

relation entre les phases de l'analyse du cycle de vie et les conditions d'utilisation des choix de valeur et des éléments facultatifs.

Une ACV conforme aux normes comprend généralement quatre phases : la définition des objectifs et du champ d'application de l'étude, la préparation d'un inventaire du cycle de vie (un inventaire des intrants et des extrants), l'analyse d'impact et enfin l'évaluation.

3.4. Différentes méthodes d'analyse environnementale :

Il existe de nombreuses méthodologies d'analyse environnementale et de multiples outils permettant leur mise en œuvre. Ces méthodes peuvent être classifiées selon plusieurs catégories (Monocritère/Multicritères, Qualitatif/Quantitatif, Orientée produits et services/orientée organisation) [25], on distingue ainsi:

3.4.1. Les analyses dites monocritères :

Ces analyses se focalisent sur un type d'impact environnemental (ex : Bilan Carbone de l'ADEME qui permet de comptabiliser uniquement les émissions de gaz à effet de serre).

3.4.1.1. Limitation :

se focaliser sur un seul impact (p.ex. les émissions des gaz à effet de serre) ne donne pas une vue d'ensemble et ne permet pas de visualiser les transferts de pollution d'un poste vers un autre et d'un impact environnemental vers un autre.

3.4.2. Les analyses multicritères :

Ces analyses considèrent différents impacts environnementaux comme le réchauffement climatique, l'eutrophisation, l'écotoxicité, ... (ex : ACV).



Fig. I-6 : Méthodes d'analyse environnementale

3.4.2.1. Avantages :

l'utilisation d'une méthodologie multicritères permet d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux et, le cas échéant, d'arbitrer les déplacements de pollutions liés aux différentes alternatives envisagées.

On distingue ensuite :

3.4.3. Les méthodologies orientées « produits » ou « services » :

à titre d'exemple l'ACV, le Bilan Carbone. En plus de leurs potentialités générales, ces méthodologies pourront également permettre de comparer des produits ou des services existants ou en projet au sein d'une même entreprise ou entre concurrents. Il s'agit d'outils permettant de définir certains principes d'éco-conception.



Fig I-7 : Matrice des méthodes conventionnelles d'analyse

3.4.4. Les méthodologies orientées «organisation» :

à titre d'exemple le GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol, en français protocole des gaz à effet de serre), le bilan Carbone «organisation» c'est-à-dire d'une entreprise.

On trouvera également :

3.4.5. Les méthodologies quantitatives :

dont l'ACV, le Bilan Carbone, GHG Protocol...

3.4.6. Les méthodologies qualitatives:

dont ESQCV (Évaluation Simplifiée et Qualitative du Cycle de Vie), Ecodesign Pilot, Check-List...), nous présentons succinctement, ci-dessous, ces trois (03) méthodes d'évaluation :

3.4.6.1. L'évaluation simplifiée et qualitative du cycle de vie – ESQCV :

L'ESQCV est l'outil représentatif des méthodes "semi-quantitative" qui consiste à prendre une "décision sans regret" en répondant à la problématique du comment prendre aujourd'hui une décision pour améliorer les performances environnementales d'un produit donné sans tout savoir sur son cycle de vie et sans avoir à regretter plus tard cette décision lorsqu'on en saura davantage.

L'évaluateur se contente dans une première phase d'un questionnaire à renseigner par un panel de connaisseurs du produit pour l'appréciation des impacts environnementaux potentiels du produit, puis dans une seconde phase il sera procédé à une évaluation quantitative des critères (postes de pollution) caractéristiques.

A l'issue de l'ESQCV, le concepteur doit être en mesure de proposer des actions concrètes d'amélioration de conception du produit.

L'ESQCV ne permet pas la comparaison de plusieurs produits.

3.4.6.2. Ecodesign Pilot :

Ecodesign Pilot est l'outil d'écoconception développé par l'Université des technologies de Vienne (Autriche), en collaboration avec l'ADEME permettant d'élaborer une stratégie performante pour le produit via quatre étapes successives qui sont : les bilans matière et énergie, la hiérarchisation entre les phases du cycle de vie, la mise en évidence d'une typologie produit pour conclure par les propositions d'améliorations qualitatives.

3.4.6.3. Check-Lists :

Les listes de contrôle (check-lists) permettent d'évaluer si un produit est plus ou moins respectueux de l'environnement par la réponse à des questions précises pour chaque étape du cycle de vie. Il s'agit d'une analyse qualitative et multicritère d'éco-conception.

3.4.7. Autres outils :

à côté des méthodologies les plus connues (ACV, Bilan Carbone, GHG Protocol, PAS 2050....), les secteurs industriels, de leur côté, développent de plus en plus des outils adaptés, souvent sous forme de logiciels. Citons par exemple :

3.4.7.1. Bilan Environnemental des Emballages - BEE:

logiciel gratuit d'ACV et d'éco-conception des emballages créés par Eco-Emballages.

3.4.7.2. Instant LCA Textile web portal :

Outil d'ACV pour le secteur textile mis en place par RDC Environnement.

3.4.7.3. Spin'it :

outil d'ACV pour le secteur textile créé par CycleCO

3.4.7.4. Eco-Bat :

logiciel permettant de modéliser rapidement les impacts d'un bâtiment et de réaliser un écobilan détaillé.

3.5. Champs d'application des méthodes d'évaluation environnementale

Les démarches varient en fonction du périmètre auquel elles se rapportent. En effet, la revue des différents outils existants montre qu'il est possible d'évaluer un procédé, un projet ou un produit, une organisation (entreprise, collectivité) ou un territoire.

Lorsqu'il s'agit d'un **procédé**, la méthode d'évaluation des impacts environnementaux doit prendre en considération l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation de ce procédé. Pour cela, les différents flux nécessaires sont détaillés et insérés dans un modèle permettant d'être le plus exhaustif possible [26]. L'outil le plus pertinent et le plus complet pour considérer les impacts d'un procédé semble être l'ACV car il est capable de décomposer le procédé sous forme de processus élémentaires auxquels les flux élémentaires entrants et sortants sont rattachés, permettant ainsi une évaluation la plus exhaustive possible [27]. Il en va de même pour un **produit** qui peut être décomposé selon les différentes étapes de son cycle de vie [ISO 14040, 2006]. A chacune de ces dernières, les flux seront alors identifiés afin que l'évaluation puisse être réalisée.

A l'échelle d'une **organisation**, outre le point de passage obligé que constitue l'étude d'impact réglementaire lorsqu'il s'agit d'une activité soumise à autorisation, les outils de type «management» peuvent alors s'avérer plus cohérents afin de prendre en considération à la fois la situation de l'organisation mais aussi les évolutions possibles en renforçant les points forts et en agissant concrètement sur les points faibles. Dans ce contexte, les outils tels que l'analyse environnementale initiale de l'ISO 14031 et le Bilan Carbone apparaissent alors les plus répandus actuellement.

En considérant désormais une échelle d'application plus large comme un **territoire**, des outils basés sur des données statistiques sont appliqués : Bilan Carbone, Empreinte écologique [28] par exemple.

Ainsi, à chaque outil correspond un périmètre d'application. Pour un **procédé** ou un **produit**, les outils les plus adaptés semblent être les outils basés sur l'analyse des flux entrants et sortants : l'ACV, MIPS (Material Input Per Service unit) et la MFA (Materials Flow Accounting) par

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

exemple. Pour une **organisation**, il s'agira de l'ISO 14031 et du Bilan Carbone. Alors que pour un **territoire**, des outils exploitant des données statistiques sur la population du territoire sont privilégiés (exemple le Bilan Carbone).

Les différents périmètres (Scopes) pris en compte concernent autant les activités internes à l'organisation que celles générées par les activités de l'ensemble de la chaîne de valeur (par exemple les phases de production et de fin de vie pour un produit). Ces postes sont regroupés en trois périmètres [ISO 14064, 2006] :

- Scope 1:** Les émissions directes de GES proviennent des installations fixes ou mobiles situées à l'intérieur de ou possédées par l'organisation (périmètre de l'étude) ;
- Scope 2:** Les émissions à énergies indirectes correspondent aux émissions associées à la production d'électricité, de chaleur ou de vapeur importée pour les activités de l'organisation.
- Scope 3:** L'ensemble des autres émissions indirectes sont produites indirectement par les activités de l'organisation qui ne sont pas comptabilisées dans les scopes 1 et 2 mais qui sont liées à la chaîne de valeur complète.

Dans la méthode MFA (Comptabilité des Flux de Matières - Materials Flow Accounting):

- **à échelle nationale ou régionale :** A ce niveau, ce sont les échanges de matières entre une économie et l'environnement naturel qui sont analysés. Les indicateurs calculés permettent alors une évaluation du niveau de pression sur les ressources du système.
- **à l'échelle d'une entreprise :** l'objectif d'une MFA est d'optimiser les processus de production (matière et énergie utilisées).
- **à l'échelle d'un produit :** la MFA correspond uniquement à la phase d'inventaire de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

La méthode MIPS a été établie pour évaluer un service et non un produit. Pour évaluer le service rendu, il est pris compte de sa consommation de ressources. L'approche service est relativement peu répandue dans les méthodes d'évaluation environnementale [29].

3.6. Avantages des outils d'évaluation

Les avantages des outils d'évaluation sont nombreux et touchent divers domaines comme les impacts évalués, la manière de les exprimer ou encore la communication qui peut en découler.

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

Lorsqu'il est question d'environnement, la **communication** reste un avantage certain. Dans le cas de l'étude d'impact réglementaire, le résumé non technique facilite la présentation des résultats au public [30] lors de la phase d'enquête publique où les résultats sont accessibles à toute la population qui souhaite en prendre connaissance. L'EPE (Évaluation de la performance environnementale ISO 14031), véritable outil de management est supposé permettre l'établissement d'un dialogue avec les différentes parties prenantes.

La communication établie lors de la réalisation d'un Bilan Carbone n'est pas du même ordre puisqu'il s'agit de communiquer vers l'extérieur les résultats de l'analyse afin de montrer d'une part que l'étude a été réalisée et d'autre part pour indiquer les objectifs devant être atteints par la suite.

L'expression de **plusieurs impacts** peut constituer un important atout pour un outil d'évaluation environnementale. Symbole d'une prise en compte de plusieurs catégories d'impacts, les résultats permettent une évaluation globale de l'ensemble de l'activité, organisation et/ou territoire. Un groupe d'impacts sera certainement plus représentatif qu'un seul indicateur. Les informations présentées peuvent être de différentes natures. C'est ainsi que dans l'étude d'impact réglementaire, les informations peuvent laisser apparaître le coût financier des solutions d'améliorations ou encore l'explication des mesures compensatoires prévoyant d'être mises en œuvre. En outre, dans l'environnement, les interactions entre différents phénomènes sont multiples ainsi les phénomènes existants ne sont pas indépendants les uns des autres et seule l'utilisation de plusieurs indicateurs environnementaux peut permettre de les évaluer. Toutefois, il n'existe aucune certitude dans les valeurs des impacts du fait de la complexité des phénomènes imprévus pouvant se produire.

Les impacts environnementaux exprimés représentent donc des impacts potentiels. Néanmoins, la représentation de ces divers impacts sous différents indicateurs vise à représenter une image plus proche à ce qui se passe en réalité notamment si une étude dans ce sens serait adossée d'un capital d'expérience.

Les méthodes MIPS, BC, GHG protocol et Empreinte Ecologique utilisent un **indicateur agrégé**. Cette présentation des résultats peut s'avérer être un atout non négligeable pour un outil d'évaluation environnementale. En effet, l'avantage de l'indicateur agrégé réside dans le fait d'obtenir un score final global pouvant alors être mise en parallèle avec la note obtenue lors d'une précédente évaluation ou pour un autre établissement par exemple. La comparabilité de l'indicateur agrégé est d'une utilité significative, notamment si cet indicateur s'exprime sous une unité pédagogique, facilement compréhensible par tous.

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

Dans ce sillage, on peut citer comme exemple une déclinaison de l'outil MIPS ((mesure de la quantité des Matières Indispensables Par unité de Service), le sac à dos écologique (du chercheur allemand Friedrich Schmidt-Bleek), qui convertit les impacts environnementaux en un poids des ressources consommées par le produit fabriqué.

L'empreinte écologique présente également cet aspect pédagogique, d'autant plus que cet indicateur est le seul qui cherche à comparer « l'offre » en ressources naturelles (la biocapacité) avec la «demande» sur ces mêmes ressources, en exprimant la totalité des impacts sous la forme d'une surface nécessaire [31].

Dans le guide méthodologique du Bilan Carbone, l'ADEME mentionne le fait que l'un des points fondamentaux de cette méthode consiste à mettre sur un pied d'égalité les émissions de gaz à effet de serre qui prennent directement place au sein de l'entité (qui sont, d'une certaine manière, de sa responsabilité juridique ou territoriale directe) avec les émissions qui prennent place à l'extérieur de cette entité. Elles sont la contrepartie de processus nécessaires à l'existence de l'activité ou de l'organisation sous sa forme [32].

Dans cette catégorie « externe », on trouvera par exemple les émissions d'un camion affrété par une entreprise alors qu'il ne lui appartient pas mais qui transporte sa production ou les matières premières nécessaires à la production (aspect indirect). Ce dernier point ne peut cependant pas être pris en compte dans tous les outils. Ainsi, une ACV ne peut être exhaustive car des choix doivent être faits concernant certains paramètres (transport, hommes, infrastructures, etc), néanmoins elle permet d'obtenir des informations sur le produit tout au long de son cycle de vie et indique à l'entreprise les pistes d'améliorations possibles. Lorsqu'une ACV est réalisée dans un objectif d'amélioration ou de décision, elle peut permettre d'agir sur un produit mais aussi de développer des stratégies de respect de l'environnement à plus grande échelle (politique d'achat, stratégie marketing).

Les avantages qui peuvent être cités concernant ces différents outils d'évaluation résident dans l'identification d'indicateurs environnementaux spécifiques notamment dans le cas de l'outil EPE [ISO 14031, 2021]. Dans le même outil, mais plus particulièrement dans l'outil MFA, un atout majeur consiste à une meilleure compréhension des interactions existantes entre une organisation et ses systèmes connexes [33].

3.7.Synthèse et positionnement des outils de l'évaluation environnementale

L'analyse des différents outils présentés précédemment et de leurs caractéristiques permettent de les positionner sur un schéma selon l'objet d'étude qu'ils considèrent ou l'échelle d'impact évaluée. Les descriptions méthodologiques disponibles dans la littérature scientifique permettent d'en connaître les principales caractéristiques, les impacts environnementaux qu'ils considèrent ou encore l'approche utilisée.

Sur la base des travaux de Gaëlle Raymond [34], l'analyse des méthodes d'évaluation environnementales a été approfondie et la Figure I-8 peut être établie en guise d'illustration et de positionnement des outils d'analyse. Ainsi, sont mis en avant, pour chacun de ces outils :

- l'objet étudié : le site ou le produit
- l'échelle d'impacts considérés : locaux ou planétaires
- l'approche méthodologique utilisée : spécifique ou générique

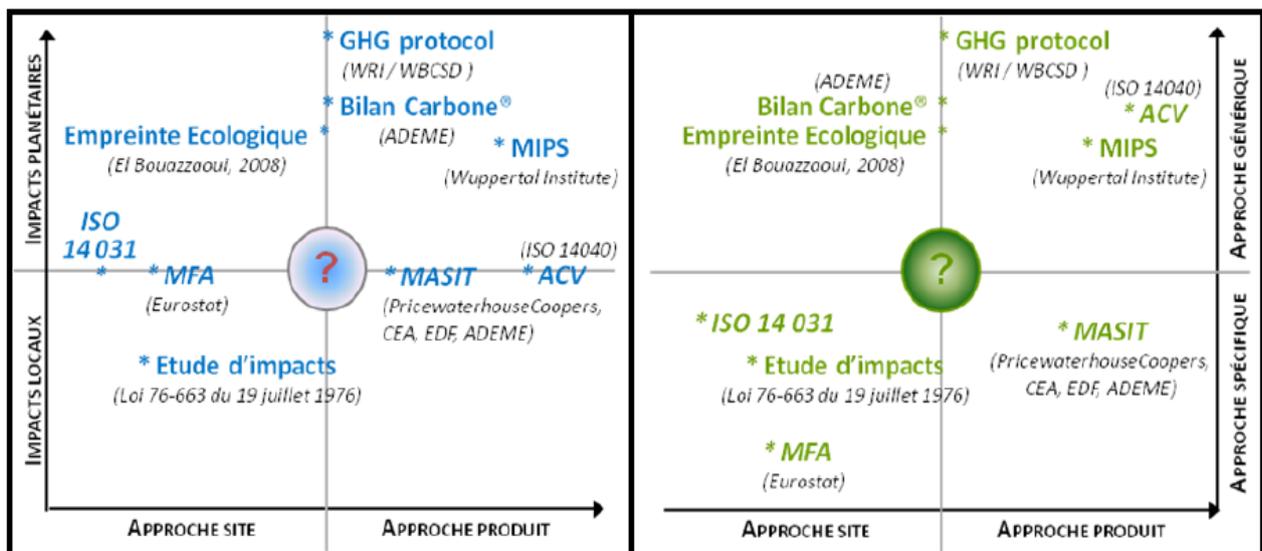


Fig. I-8 : Positionnement de neuf (09) outils d'évaluation environnementale selon les Sites/approches/impacts considérés par chacun d'eux [33]

En conclusion, les principaux avantages qu'il paraît indispensable d'avoir dans une méthode d'évaluation environnementale sont :

- L'expression des impacts sous plusieurs indicateurs afin de conserver un degré d'information suffisant pour agir en fonction des enjeux et des priorités identifiés pour l'organisation faisant l'objet de l'étude ;
- Un indicateur agrégé peut néanmoins être utilisé pour ses vertus pédagogiques ;

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

- Un indicateur d'éco-efficience peut permettre de croiser un indicateur environnemental avec une donnée économique ou sociale.

En considération de ce soubassement de littérature, l'ACV étant l'outil d'analyse multicritères orientée processus et/ou produit s'avère la plus idoine pour la réalisation des objectifs poursuivis par cette thèse.

4. La méthodologie d'Analyse du Cycle de Vie – ACV

4.1. Historique de l'ACV

La première étude d'ACV connue a été réalisée par Coca-Cola en 1969 pour déterminer l'intérêt, ou non, de fabriquer des cannettes métalliques. Le début des études ACV date donc de la fin des années 1960 et du début des années 1970 où les préoccupations étaient orientées essentiellement vers la consommation d'énergie et de matières premières ainsi qu'au traitement des déchets.

Au cours des années 1970 et 1980, le recours à l'ACV est resté limité en raison de la méconnaissance de la méthode. Son utilisation est restée confinée aux producteurs d'emballage ainsi qu'aux politiciens responsables de la gestion des déchets. Suite aux premiers chocs pétroliers, l'énergie était le point d'intérêt principal de ces études [35].

L'environnement et les conséquences des actions de l'Homme sur ce dernier vont connaître un intérêt grandissant dans les années 1980 suite à des catastrophes chimiques comme l'accident de Bhopal en 1984 ou encore l'explosion nucléaire à Tchernobyl en 1986. Dès lors, la méthode de l'ACV restée relativement dans l'ombre jusqu'alors va susciter un regain d'intérêt. Cependant, l'ACV aboutissant à des résultats différents pour les mêmes produits est soumise à controverse et entraîne de nombreux débats [36] [37].

Dans les années 1990, la méthode va connaître une époque d'harmonisation où les différentes expériences et les acquis capitalisés durant les deux décennies précédentes vont être mis en commun. La Société de Toxicologie et de Chimie Environnementale (SETAC) prend en main l'organisation de conférences et de groupes de travail pour l'amélioration de la méthode. La SPOLD (Society for the Promotion of Life Cycle Development) a également été créée en 1992 en vue de développement de bases de données publiques et accessibles. Un code de conduite est publié en 1993 afin d'obtenir une harmonisation dans les étapes nécessaires à une telle étude. Des normes ISO sont ensuite (en 1998) développées et remises à jour en 2006 pour donner un cadrage méthodologique uniformisé à l'ACV.

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

La norme ISO 14040 définit les principes et le cadre de l'Analyse du Cycle de Vie, tandis que la norme 14044 intitulée « **MANAGEMENT ENVIRONNEMENTAL-Analyse du cycle de vie : Exigences et lignes directrices** » regroupe le contenu technique nécessaire au bon déroulement d'une ACV. Dans le souci d'un cadrage encore plus précis, l'Union Européenne au travers du Joint Research Center - JRC a également publié un guide de bonnes pratiques relatif à la réalisation d'une ACV [38].

Plusieurs approches, guides et méthodes ont été développées pour mettre en pratique les dispositions des normes ISO 14040 et ISO 14044 lors d'ACV dédiée à un produits ou à une activité spécifiques.

4.2. L'Analyse du Cycle de Vie et la norme ISO 14044 :

Comme évoqué à la section 3 de ce chapitre, la norme ISO 14044 est venue fixer un cadre méthodologique global pour mener une analyse du cycle de vie d'un produit (bien ou service), d'un ouvrage ou d'un processus.

4.3. Cycle de vie d'un produit :

chaque produit passe par des étapes chronologiques et techniques qui forment son cycle de vie, à savoir:

- La naissance du produit qui comprend l'extraction des matières premières ;
- la fabrication (berceau du produit);
- le transport et la distribution du produit
- L'utilisation du produit et éventuellement son entretien et sa maintenance ;
- La mort (la tombe) du produit par la valorisation ou par l'élimination (la fin de vie).

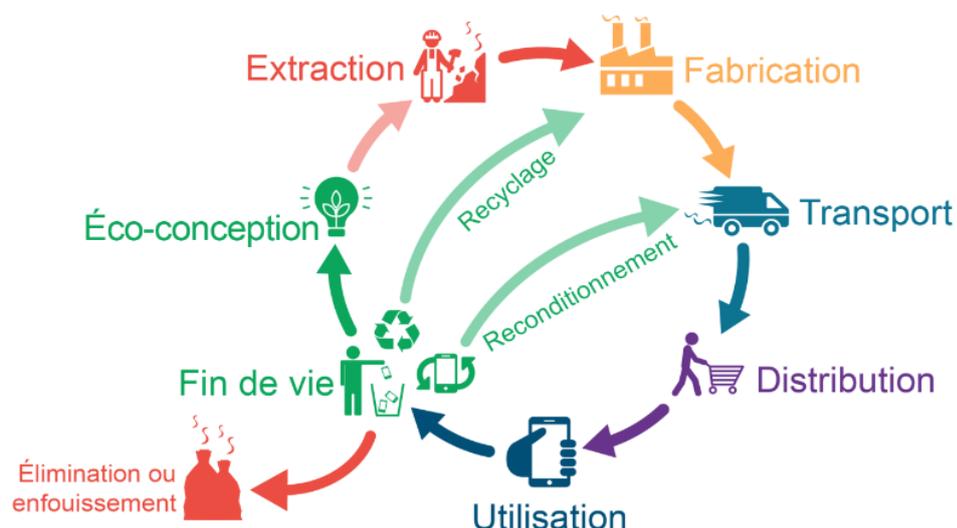


Fig. I-9: Représentation simplifiée du Cycle de vie d'un produit
Source : <https://www.playhooky.fr/technologie/cycle-de-vie/>

4.4. Répercussions des étapes du cycle de vie sur l'environnement :

Chacune de ces étapes a des répercussions sur l'environnement :

4.4.1. L'extraction et la production des matières premières :

Phase du cycle de vie utilisant de nombreuses ressources en sus des ressources secondaires qui pourraient provenir de recyclage, les ressources primaires telles que les matières extraites, les substances dangereuses, l'énergie et l'eau... engendrent de la pollution, de la dégradation des sols, la fragilisation et la destruction des écosystèmes ce qui porte atteinte à la biodiversité et impacte le climat ;

4.4.2. Le transport:

Nécessitant de l'énergie (carburant/électricité), il est la conséquence directe de l'émission de CO2 et la pollution de l'air mais davantage d'extraction de ressources fossiles nécessaires à la production du carburant;

4.4.3. Le déballage, l'utilisation, et la maintenance du produit :

qui pourraient nécessiter d'autres ressources pour la mise en fonctionnement, l'entretien et la maintenance ce qui engendrent des émissions et des déchets de différents types.

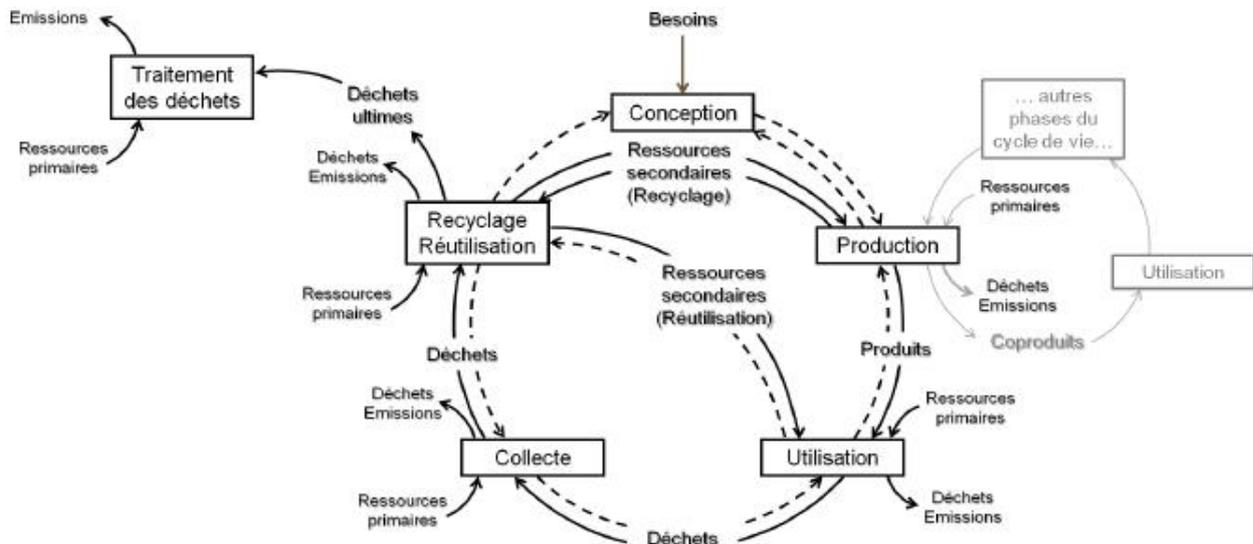


Fig. I-10 : Représentation détaillée du cycle de vie d'un produit (d'après REBITZER et al.) Les flèches pleines représentent les flux de matériel/matériaux et d'énergie alors que les flèches en pointillés traduisent les flux d'information. La présence d'un cycle de vie secondaire (en filigrane) montre que plusieurs cycles de vie peuvent être imbriqués les uns dans les autres [145].

4.4.4. La valorisation (recyclage) et/ou l'élimination :

phase nécessite des ressources pour la collecte, le stockage, la valorisation, l'incinération et l'enfouissement qui vont avoir d'importants impacts sur le l'environnement et le climat à cause de diverses émissions particulièrement celles ayant des caractéristiques toxiques [39].

4.5. Les applications de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) :

4.5.1. L'ACVS et l'ACVE :

L'ACV permet d'évaluer les effets environnementaux à chaque étape du cycle de vie d'un produit, d'un service ou d'un système en analysant les flux entrants (ressources, énergie...) et sortants (Déchets, pollution) [40].

En plus de l'aspect écologique, l'ACV, normalisée par les ISO 14040 et 14044, peut être élargie, de manière analogique, aux autres aspects du développement durable dont l'aspect social (ACV Sociale) et économique (ACV Economique), ce qui permet, à l'issue de l'étude (ACVS ou ACVE), de se prononcer sur l'impact social et la rentabilité économique d'un processus, produit ou service.

4.5.2. Un outil d'aide à la décision :

L'Analyse du Cycle de Vie sert à comparer des produits rendant la même fonctionnalité entre eux, pour faire durer ses produits en termes d'utilisation et d'entretien ou pour valoriser le produit de la meilleure façon en fin de vie.

La comparaison de deux (02) produits, services ou processus par la méthode ACV permet de cerner de manière plus précise leurs potentiels d'impacts environnementaux et d'en conclure plus objectivement celui qui dispose d'une meilleure performance environnementale et de durabilité. Dans ce sens, les ACV comparatives permettent un examen anticipatif des éventuelles solutions envisagées et/ou des projets de produits palliatifs et d'éviter d'être induit en erreur par des options qui ne constituent, en réalité, qu'un déplacement des risques environnementaux d'une phase de cycle de vie à une autre.

4.6. Autres applications possibles de l'Analyse du Cycle de Vie

Les résultats des études ACV peuvent servir, à la fois, à :

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

- l'éco-conception des produits et des procédés, avec la prise en compte des aspects environnementaux dès leur conception ;
- la sélection (le choix) du produit ou du procédé le plus respectueux de l'environnement parmi plusieurs solutions proposées (en comparant leurs cycles de vie) et en anticipant tout déplacement de pollution;
- l'amélioration d'un produit ou d'un procédé par l'observation des points faibles pour l'environnement durant son cycle de vie ;
- la gestion d'un procédé par son suivi et son contrôle en le comparant à une situation de référence ou à des résultats escomptés ;
- La contribution à l'identification des choix stratégiques des entreprises et des politiques publiques l'échelle étatique ou des collectivités locales ;
- la proposition de réglementations concernant l'environnement par comparaison d'ACV de plusieurs procédés rendant le même service.

L'Analyse du Cycle de Vie est utilisée notamment pour l'étude et l'obtention des labels des produits dont l'objectif principal est de favoriser les produits verts qui, à valeur d'usage et qualité égales, ont l'impact global jugé le plus faible sur l'environnement à tous les stades de leur vie.

4.7. Les phases d'une étude ACV :

Dans sa dernière version, la norme ISO 14044 a structuré l'étude d'une ACV en quatre phases :

- a) la phase de définition des objectifs et du champ de l'étude,
- b) la phase d'inventaire,
- c) la phase d'évaluation de l'impact, et
- d) la phase d'interprétation.

Autrement dit une étude ACV démarre d'une définition des objectifs et du périmètre de l'étude pour ensuite arrêter un inventaire quantitatif des flux de matières et des ressources consommées, d'émission de substances générées et de rejet de déchets (des intrants et des extrants) liés aux phases de vie du système de production du bien ou service étudié, évaluer, selon des critères précis, leurs impacts environnementaux pour terminer avec une interprétation des résultats obtenus [41] (fig. I-12).w

De par l'hypothèse que toute consommation de ressources ou d'émission de polluants engendre un impact sur l'environnement, le calcul doit concerner toutes les quantités relatives à l'inventaire tout

en les rapportant à l'unité fonctionnelle. Il s'agit donc de tous les intrants et les extrants du système de production du bien ou service étudié.

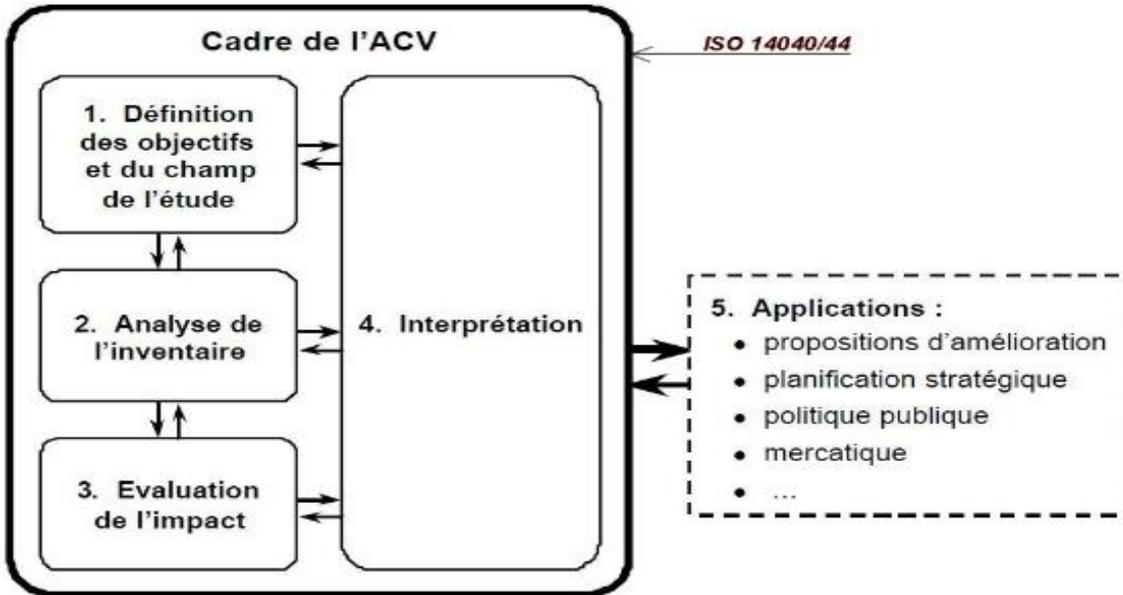


Fig. I-11 : Etapes de conduite d'une étude ACV selon ISO 14040 & 14044 (La phase 5 portant les applications ne rentrent pas dans le champ d'application des normes) [146]

A l'issue, l'inventaire d'ACV aboutit à la phase d'évaluation et de la modélisation des impacts environnementaux.

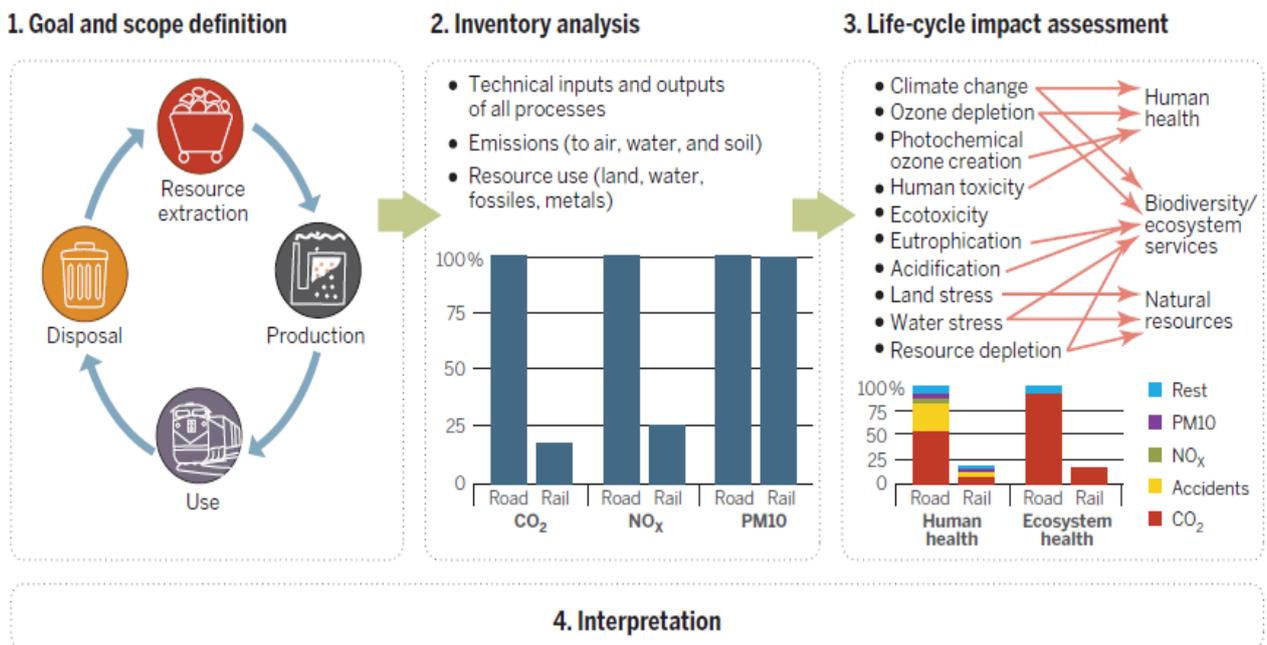


Fig. I-12 : Représentation graphique des 04 phases successives d'une ACV comparative (exemple Transport routier vs transport ferroviaire) [41].

L'évaluation des impacts environnementaux nécessite le recours à une des méthodes reconnues en la matière fixant les techniques de regroupement des flux de l'inventaire au sein de catégories d'impacts comme stipulé par la norme, puis, chaque flux est pondéré à l'aide de facteurs de

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

caractérisation préalablement défini par la méthode considérée [41]. L'étude ACV fait appel, à ce niveau, aux outils de modélisation dont des logiciels conçus pour accéder aux bases de données, traiter les données acquises et/ou fournies, établir le calcul des indicateurs selon la méthode adoptée et élaborer les modèles.

Plusieurs indicateurs d'impacts globaux peuvent être calculés comme le réchauffement climatique global, l'épuisement de ressources, la toxicité humaine, l'écotoxicité (cf Fig.I-12)

La dernière phase concerne l'interprétation des résultats de la modélisation et d'évaluation. Elle peut, en effet, entraîner la redéfinition des objectifs de l'étude.

A souligner que la réalisation d'une étude ACV est une démarche itérative.

4.7.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude ACV

Une ACV, doit faire preuve de transparence lors du choix du périmètre d'étude et des objectifs. Le processus d'ACV étant une technique itérative, la possibilité de redéfinir, ultérieurement, le champ d'application est possible, il convient, toutefois, de justifier toute modification et choix adoptés par l'analyste.

Ces réajustements peuvent, également, intervenir lors de l'étude face aux contraintes non prévues préalablement notamment celles liées à la collecte de données.

Les étapes de l'ACV sont intimement dépendantes, les objectifs et les choix méthodologiques au niveau de chaque étape dépendent du cadre défini dans la première étape de l'ACV (ie : objectifs et périmètre de l'étude).

Cette première étape est capitale car elle détermine l'orientation de l'étude dans sa globalité et peut avoir une influence sur la perception des résultats notamment lors de l'étape d'interprétation.

Dans cette étape ; il est inclus :

- L'application envisagée de l'étude ;
- Les raisons et motifs conduisant à réaliser l'étude ;
- Le public et entités concernés par l'étude et qui auront accès aux résultats ;
- L'usage qui sera fait des résultats (ex. appuyer la prise de décision) ;

- La détermination de l'unité fonctionnelle ;
- La description du système de produits à étudier, ses frontières et les éventuelles exclusions;
- Les hypothèses générales de l'étude ;
- Les limitations ;
- Les règles d'affectation ;
- La méthodologie d'évaluation ;
- Les exigences sur la qualité des données ;
- La gestion des données manquantes ;
- Le type et format du rapport ;
- Le besoin de revue critique par une tierce partie.

4.7.2. Fonction et Unité Fonctionnelle (UF):

Au lancement d'une étude ACV et après détermination des objectifs et du champ de l'étude, une unité fonctionnelle est fixée et ce pour des impératifs d'objectivité, de comparabilité et d'identification de solutions meilleures notamment du point de vue environnemental.

La norme ISO 14044, définit l'Unité Fonctionnelle comme étant une *“Performance quantifiée d'un système de produits, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une ACV”*.

Autrement dit, l'unité fonctionnelle permet de définir sur quelle base la performance environnementale du produit doit être évaluée et/ou comparée.

L'UF est utilisée également pour pondérer, introduire et comparer sur une base commune les résultats d'une ACV (comparer deux (02) unités de deux produits différents, sans tenir compte de l'unité fonctionnelle, est une erreur même s'ils remplissent la même fonction).

Le choix de l'unité fonctionnelle sera fait en chiffrant le service rendu par le produit, il faut retenir, par exemple, une action quantifiée pendant une durée de temps déterminée.

Pour déterminer une unité fonctionnelle, il faut :

- Mettre en évidence la fonction principale (la raison d'être) du produit à étudier (la finalité du produit);
- Caractériser le produit par une performance pertinente, précise et mesurable [42] (selon des prescriptions normalisées ou reconnues par l'usage);

L'UF doit répondre aux questions : "Quoi ? Combien ? Comment ? Combien de temps ? "

En pratique L'UF est décrite par:

- un verbe d'action pour préciser la fonction,
- un nom pour préciser sur quoi agit la fonction,
- une durée de vie.
- Si nécessaire, une qualification complémentaire pour préciser un dimensionnement ou gamme de produit ;

Afin que la fonction désirée soit remplie, il faut définir le flux de référence : la quantité nécessaire du produit pour répondre à l'unité fonctionnelle.

4.7.2.1. Exemples de formulation de l'UF

Ci-après des exemples d'unité fonctionnelle issue d'études d'ACV :

Pour comparer les performances de deux (02) matériaux qui servent à un usage identique en plomberie (tuyauterie), l'unité fonctionnelle retenue est un tube d'un (01) mètre linéaire de longueur et de vingt-deux (22) mm de diamètre pour transporter de l'eau à une pression d'1 bar.

Dans le cas de l'étude ACV de deux peintures, la fonction principale étant la protection et l'embellissement d'un mur, l'unité fonctionnelle peut être de couvrir 1m² de mur pendant 20 ans.

Pour comparer deux carburants dont la fonction principale est de fonctionner un moteur à combustion, l'unité fonctionnelle pourrait être : faire tourner un moteur d'une cylindrée de 02 litres pendant 20 heures à 1000 tours/minutes.

Pour comparer deux (02) types de lampes à éclairage, la fonction principale étant l'éclairage et l'UF à considérer comme base de référence est: la réalisation d'un éclairage en 4000 lumens d'un espace intérieur de 20 m² pendant 20 000 heures.

La fonction et l'unité fonctionnelle intelligemment définies sont suffisamment ouvertes pour comparer des produits, assurant la même fonctionnalité.

4.7.3. Flux de référence :

Le flux de référence désigne l'ensemble des consommables utilisés (intrants nécessaires) dans la quantité du produit analysé durant les différentes étapes afin de rencontrer (obtenir) les besoins de l'unité fonctionnelle (élément à prendre en compte leur d'utilisation du logiciel et de la base de données ACV).

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

Il s'agit de garder à l'esprit , durant toute l'étape de réalisation de l'inventaire pour toutes les phases du cycle de vie du produit étudié, l'unité fonctionnelle. Autrement-dit la quantité de chaque substance de l'inventaire est indexé proportionnellement à l'unité fonctionnelle.

Dans les composants du même produit, il se pourrait que nous aurons besoin de trois (03) unités du 1^{er} composant , d'une (01) unité du 2^{ème} composant et de deux (02) unités du 3^{ème} composant... pour réaliser l'unité fonctionnelle préalablement définie.

Le flux de référence est généralement établi par l'application de la règle de trois ou règle de proportionnalité.

4.7.4. Les frontières du système :

Une étude ACV est réalisée en modélisant des systèmes de produits qui décrivent les éléments principaux des systèmes physiques dont les processus élémentaires sont identifiés en précisant leurs frontières. Généralement, il est usuel de définir des frontières pour le système au-delà desquelles la recherche d'information ne se fera pas. Il est aussi nécessaire d'avoir des données suffisamment précises sur les intrants et processus du système délimité. Il convient aussi, pour faire preuve de rigueur et pour que la cohérence avec les objectifs et le champ de l'étude soit assurée, de modéliser le système de sorte que ses intrants et extrants aux frontières soient des flux élémentaires.

La frontière du système définit les processus à inclure dans le système à étudier et à modéliser. Cela permettra dans le processus d'ACV, de réaliser un inventaire des entrants et sortants du système de manière exhaustive, soit en d'autres termes, la détermination de la frontière du système consiste à déclarer ce qui sera comptabilisé ou pas dans l'étude d'ACV, notamment en phase d'établissement de l'inventaire du cycle de vie (ICV).

En raison qu'elle pourrait être à l'origine d'erreurs de modélisation, l'exclusion de certaines parties qui s'articulent de manière forte avec le système doit être justifiée.

4.7.5. Systèmes des produits et processus élémentaires :

Dans une étude ACV, le cycle de vie d'un produit est modélisé sous la forme d'un système de produits qui assure une (ou plusieurs) fonctions bien définies.

Les systèmes de produits se subdivisent en processus élémentaires (voir figure I-14) qui sont liés entre eux par des flux consommés et rejetés par ces procédés.

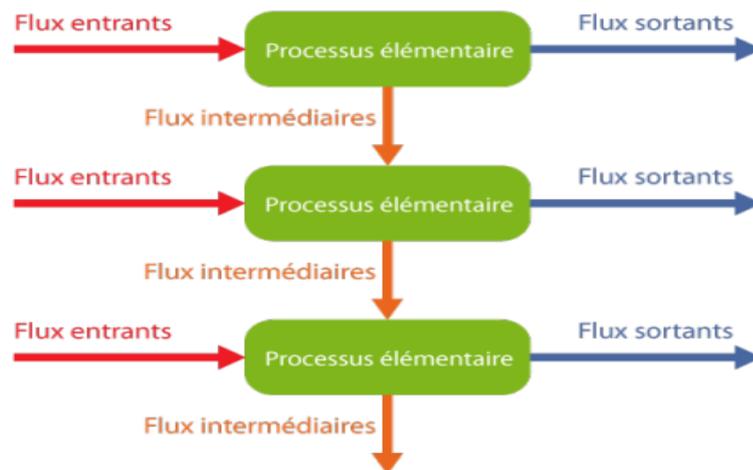


Fig. I-13 : Système de produits et de processus élémentaires

Les flux correspondent donc aux échanges entre :

1. le système industriel considéré et les milieux naturels (air, sol, eau); et
2. les acteurs au sein du système.



Fig. I-14 : Ressources circulantes à l'intérieur du système de produits constituant les flux entrants et sortants

Un système comporte des processus de transformation, de transport et de stockage. Les ressources qui circulent à l'intérieur de ce système entreront et sortiront sous la forme de matières et d'énergie notamment (voir figure I-15).

Dans une représentation socio-économique (figure I-15), les flux entrants et sortants prendront la forme de déchets, de produits ou de flux environnementaux (ressources naturelles extraites, polluants émis ...).

Un processus peut également comporter des flux entrants et sortants non physiques (services) ayant une valeur socio-économique.

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

Les flux entrants de produits et de services proviennent des processus de production, les flux sortants de déchets sont dirigés vers des processus de traitement.

Les flux entrants de produits et de services, les flux sortants de déchets et les flux environnementaux correspondent à des **charges environnementales**.

On distingue en ce contexte des flux élémentaires (directement puisés ou rejetés dans les milieux naturels) et des flux non élémentaires (entre les acteurs intervenant dans le système) – (figure I-16)

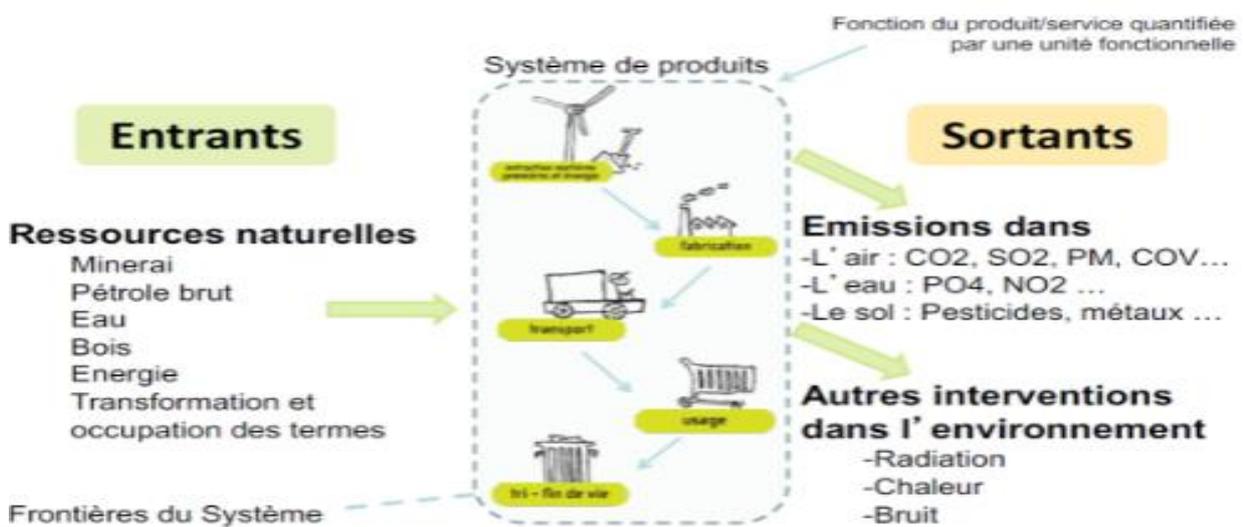


Fig. I-15: Frontières du système dans une étude ACV

4.7.6. Inventaire de cycle de vie (ICV) :

Il s'agit de la deuxième et la plus compliquée des étapes de l'Analyse du Cycle de Vie. Elle représente 50 à 75% du travail dans une étude ACV. L'objectif consiste à établir la liste exhaustive des flux entrants et sortants pour chaque étape du cycle de vie du produit.

Le recueil des données est la tâche la plus fastidieuse dans le processus d'ACV, toutefois elle est, de plus en plus, facilitée par le développement des bases de données offrant des jeux de données relatifs aux flux des milliers de processus industriels. Les coûts d'accès aux bases de données pourraient constituer une contrainte pour les analystes du cycle de vie.

4.7.6.1. Inventaire des flux, collecte et analyse des données :

L'inventaire consiste à déterminer et à quantifier les différents flux traversant le système étudié tout en tenant compte de l'unité fonctionnelle.

Les données d'inventaire sont constituées de flux de matières (ressources naturelles notamment) et d'énergies entrant dans le système étudié et des flux sortants correspondants (déchets, émissions gazeuses, liquides, etc.).

Les flux entrants se composent des matières premières et de l'énergie requise pour la réalisation de chaque étape tandis que les flux sortants représentent les déchets et les rejets émanant des différentes étapes du cycle de vie. Les données récoltées se répartissent alors en deux catégories: les facteurs d'activité (kWh consommés, km parcourus, tonnes transportées, ...) et les facteurs d'émission (g de NOx émis dans l'air, g de PO4 émis dans l'eau, g déchets solides rejetés...)

4.7.6.2. Inventaire des flux (énergétiques, matériaux) :

L'inventaire des flux élémentaires ou inventaire des extractions et des émissions est la description quantitative des flux de matière, d'énergie et des polluants qui traversent les limites (frontières) du système étudié. Le regroupement des ressources utilisées et des substances polluantes est quantifié pour la totalité des étapes du cycle de vie.

De plus amples détails afférents à cet aspect sont fournis dans la troisième partie de cette thèse.

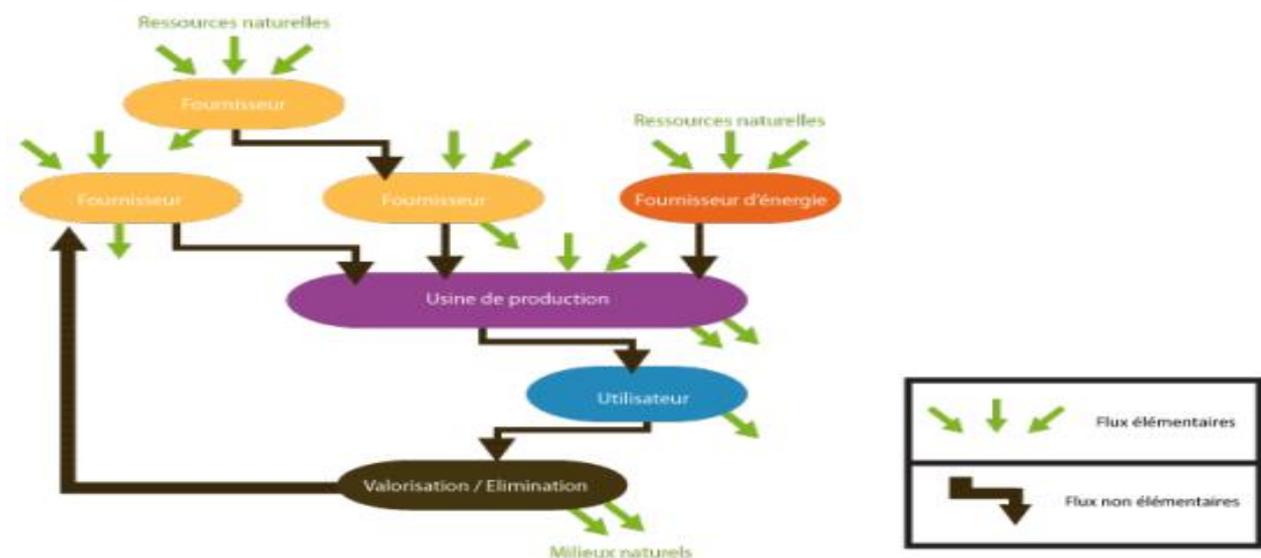


Fig. I-16 : classement et différences entre flux élémentaires et des flux non élémentaires (secondaires) des processus lors de l'analyse d'inventaire ACV

Source : http://acvbat.univ-valenciennes.fr/chap03/co/ch03_180_3-2-3.html

4.7.7. La collecte des données

Des données qualitatives et quantitatives doivent être collectées pour chaque processus élémentaire inclus dans les frontières du système. L'acquisition de ces données peut se faire par mesure, calcul et/ou estimation ou importées des bases de données dédiées. Les données sont incluses dans l'inventaire en les classant dans plusieurs catégories, respectivement :

- Intrants énergétiques, de matières premières, auxiliaires, autres intrants physiques.
- Produits, coproduits et déchets.
- Émissions dans l'air, l'eau et le sol.
- Autres aspects environnementaux.

Lorsque la source de provenance des données est publique, elle doit être citée en précisant les détails sur le processus de recueil, l'époque à laquelle ces données ont été collectées et d'autres indicateurs de qualité éventuels. Il faut également mentionner si les données ne satisfont pas les exigences en matière de qualité pour divers facteurs, notamment:

- Les facteurs temporels (ex. : durée minimale de collecte) ;
- La couverture géographique (la zone de collecte) ;
- La fiabilité et la complétude (mesures de variabilité et pourcentage des flux mesurés/estimés) ;
- La représentativité et la cohérence ;
- La reproductibilité et l'incertitude.

Le traitement des données manquantes doit être documenté (justifié). Pour réduire le risque de mauvaise interprétation (ex. : double comptage lors de la validation ou de la réutilisation des données collectées), une description de chaque processus élémentaire doit être faite.

Après le recueil des données, des procédures de calcul sont nécessaires pour générer les résultats de l'inventaire du système défini pour chaque processus élémentaire et pour l'Unité Fonctionnelle choisie. Ces procédures comportent plusieurs étapes opérationnelles.

1. La validation des données collectées, qui peut consister dans la mise en œuvre des bilans massiques, des bilans énergétiques et/ou des analyses comparatives des facteurs d'émission.
2. L'établissement des relations entre les données et les processus élémentaires ou encore avec l'Unité Fonctionnelle.

3. L'analyse de sensibilité permettant de déterminer le manque d'importance de certaines données collectées ou pour voir si d'autres données doivent être rajoutées. L'analyse de sensibilité peut donc donner lieu à :
 - l'exclusion d'étapes du cycle de vie ou de processus élémentaires,
 - l'exclusion d'intrants et d'extrants,
 - l'introduction de nouveaux processus élémentaires, intrants et extrants dont l'importance est démontrée.
4. L'affinage de la frontière du système, suite à l'analyse de sensibilité.

4.7.8. Analyse de l'inventaire

L'étape d'analyse d'ICV consiste à répertorier l'ensemble des flux à l'intérieur et à l'extérieur du système pris en compte pour l'étude. Deux catégories de flux sont identifiées pour une Analyse du Cycle de Vie :

- les flux économiques qui représentent les flux de matière, énergie, services, échangés entre les processus élémentaires et avec des systèmes extérieurs,
- les flux élémentaires qui sont des flux échangés avec l'écosphère (matières premières, déchets remis dans l'environnement, émissions).

L'analyse se fait en quatre (4) étapes :

1. Quantification des flux (économiques et élémentaires) associés à chaque processus élémentaire ;
2. Mise à l'échelle de ces flux en fonction d'une valeur (flux) de référence ;
3. Quantification des émissions et extractions pour chaque processus élémentaire, le but étant d'identifier tous les éléments qui ont un impact environnemental à chaque étape ;
4. Agrégation des flux élémentaires : toutes les données pour une source d'impact sont agrégées pour calculer les impacts à l'étape suivante. Par exemple, toutes les émissions de CO₂ de tous les processus élémentaires sont additionnées en une seule valeur (massique) pour la multiplier par le facteur de caractérisation ce qui permet de calculer la valeur de l'indicateur d'impacts d'une catégorie quelconque (Effet de serre, par exemple)

4.7.8.1. Négligeabilité des flux et critères de coupure:

Il est souvent impossible de prendre en compte tous les composés constituant un produit complexe et il peut être envisagé de négliger certains flux pour simplifier les calculs en définissant les critères d'inclusion ou d'exclusion.

Le réalisateur de l'ACV est donc amené à fixer des critères de coupure ou des règles de « négligeabilité » dont le principe est généralement le suivant :

4.7.8.1.1. Quantitativement :

sont négligés tous les composants représentant moins de X % de la masse totale du produit (critère de masse) puis on vérifie que la somme de ce qui est pris en compte reste supérieure à un pourcentage fixé, toujours proche de 100 % (Par exemple : dans le cas des produits de construction : 98 %) et,

4.7.8.1.2. Qualitativement :

sont négligés tous les composants ne présentant pas de caractéristiques de dangerosité particulière (ex : substances toxiques, déchets radioactifs, ...) ou d'autres problèmes spécifiques établis (ex : composé dont l'obtention est connue comme particulièrement polluante ou consommatrice d'énergie), dans la négative, ces composés seront réintégrés dans l'analyse, quelle que soit leur quantité (critère de la portée énergétique et environnementale).

Des critères de coupure semblables peuvent également permettre d'identifier quels extrants il convient de les suivre dans l'environnement, par exemple en incluant les processus finaux de traitement des déchets [43].

Pour la prise en compte initiale des intrants et des extrants, les critères de coupure et les hypothèses ayant servi à les définir doivent être clairement précisés. Leur effet potentiel sur le résultat de l'étude doit également être analysé et décrit dans le rapport final.

4.7.9. Les sources de données de l'inventaire :

Les données d'inventaires sont constituées de flux de matières (ressources minérales fer, bauxite, eau...) et d'énergies (pétrole, gaz, charbon...) entrant dans le système étudié et des flux sortants correspondants (déchets, émissions gazeuses ou liquides,...). Il existe des bases de données d'inventaires de cycle de vie, plus particulièrement pour les matières premières courantes, l'énergie, les transports. Ces données sont accessibles à des coûts divers et variés.

Certains groupements ou fédérations professionnelles ont rassemblé des données sur les impacts environnementaux de leurs matériaux tout au long de leurs cycles de vie ou, plus fréquemment, sur la partie amont de ce cycle afin de les mettre à disposition des utilisateurs des dits matériaux afin qu'ils les intègrent dans leurs propres études ACV.

Pour les données spécifiques à l'étude, la collecte des données est souvent à réaliser au cas par cas, par un recueil sur site industriel (enquêtes), par des recherches bibliographiques, ou encore par la mise en perspective d'études antérieures.

4.7.9.1. Les bases de données

Les bases de données représentent les sources essentielles utilisées par les logiciels d'ACV pour calculer les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service. Ce sont des fichiers tableurs dans lesquels sont stockées toutes les informations concernant les données enregistrées lors de leur conception [44].

On distingue trois composantes principales dans la composition d'une base de données:

- Les matériaux, qui représentent la matière première des processus de fabrication (produits chimiques, métaux, matière primaire minérale et plastique, papier, biomasse, matériaux biologiques).
- Les process de production qui engendrent des impacts par les consommations énergétiques nécessaires à la transformation des matières premières ou pour le traitement des déchets (incinération, déposition, assainissement). Les Inventaires de Cycle de Vie pour l'énergie sont souvent réalisés selon leur provenance et le type du bouquet énergétique (électricité, pétrole, charbon, gaz naturel, biocarburants, bioénergie, hydro-électricité, nucléaire, solaire, éolienne, biogaz).
- Le transport de mise à disposition (trafic routier, ferroviaire, aérien, maritime). Très souvent les usines ne sont pas localisées à côté des sites d'extraction de matières premières, des produits semi-fabriqués, de production d'énergie et des divers fournisseurs. L'acheminement des énergies nécessite des infrastructures et celui des produits nécessitent des étapes supplémentaires de transport afin de réaliser les assemblages finaux ou de faire subir aux produits d'autres transformations intermédiaires. Le transport vers le site de vente ainsi qu'éventuellement le transport du magasin au domicile du client doivent être quantifiés également. Sur les bases de données, les divers modes de transport sont identifiés clairement, on peut prendre en compte les consommations énergétiques liées au déplacement des produits à divers stades du cycle de vie.

De nombreuses bases de données existent actuellement. Elles sont structurées selon des critères plus ou moins adéquats et importants. On peut trouver par exemple des classifications par type d'industrie ou par type de produit. Ou encore selon des critères comme les fonctionnalités ou l'utilisation.

La mise en place des bases de données est coûteuse et nécessite beaucoup de travail. Une fiche matériau est elle-même une Analyse du Cycle de Vie pour laquelle il faut parfois

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

travailler en équipe et mobiliser des spécialistes de divers domaines (notamment de la chimie, de la biologie...) sur plusieurs mois afin d'identifier avec précision la liste de substances rentrant dans la composition du matériau étudié, grâce à laquelle les impacts peuvent être calculés. Le regroupement des intrants et des sortants au sein d'une fiche est fait selon leur appartenance aux milieux naturels qui nous entourent, c'est-à-dire l'eau, l'air et le sol.

Certaines bases de données sont actualisées et mises à jour en continu par des industriels regroupés par branche (automobile, industrie agro-alimentaire, électronique, etc.). A cause du travail très coûteux de recueil de données et d'évaluation des impacts, l'utilisation de ces bases de données est très souvent payante. Ceci est dommageable du fait qu'il empêche beaucoup d'utilisateurs d'accéder aux données nécessaires pour réaliser des ACV et les amène à faire des hypothèses simplificatrices, conduisant à un manque de précision compromettant la fiabilité de l'étude réalisée.

Outre les bases de données classiquement associées aux logiciels d'Analyse du Cycle de Vie, on retrouve des bases de données associées à des outils permettant de calculer par exemple l'empreinte eau. Une des plus connues bases de données de ce type est « Quantis Water Database » associée au logiciel « Quantis SUITE 2.0 ».

Certaines bases de données spécifiques à certains secteurs d'activités ont été développées. C'est le cas de la base de données INIES en France, base de données publique et nationale de référence pour les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction depuis sa création en 2004.

Un focus sur la panoplie des bases de données dédiées à l'ACV est présenté dans la 2ème partie de cette thèse.

4.7.10. Caractéristiques et choix des données

Comme indiqué précédemment, les bases de données sont structurées de manière différente. Une comparaison de données entre différentes bases ne peut donc être réellement efficace que par le biais de la standardisation des méthodes de collectes de données et du format d'enregistrement utilisé. Il s'agit d'un format conforme aux spécifications de la norme ISO 14048 portant « Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Format de documentation de données » [45].

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

Ce format "open source" a pour but de simplifier la communication entre les utilisateurs des bases de données ou de logiciels d'ACV et il permet de convertir tout type de données indépendamment de leur provenance.

Afin de faire un choix pertinent des sources de données pour leur utilisation, il est indispensable de prendre en compte leur disponibilité. Une Analyse de Cycle de Vie effectuée sans avoir à disposition toutes les données nécessaires (en faisant des hypothèses par exemple) sera forcément différente d'une étude pour laquelle on a pu collecter la totalité des informations.

Pour pallier le manque de données et gérer toutefois les études pour lesquelles des données manquent, on peut procéder à des estimations faites par des experts ou utiliser des valeurs approximatives, représentatives des données réelles indisponibles en plus des données repérées sur d'autres travaux dont la crédibilité a été approuvée.

Un deuxième paramètre permettant de juger la qualité des données (provenant des bases de données ou collectées par la personne qui réalise l'étude ACV) est l'incertitude des valeurs prise en compte. Une analyse s'impose en ce contexte ; elle peut être faite sur les incertitudes concernant les entrants, la variabilité de données, ou encore par rapport aux modèles d'évaluation des impacts environnementaux.

Une indication importante relative à la qualité d'une donnée est fournie par l'étude détaillée des informations relatives à son obtention. Selon le fait que la donnée est agrégée, mesurée ou estimée, ou selon la provenance géographique des informations (région/pays où elle a été collectée) [46], on peut encore juger la fiabilité des données et estimer leur qualité. Des méthodes d'évaluation qualitative existent également, on rappelle en ce sens la méthode "*Data Quality Indicators*", proposée par Wang, Reddy et Kon [47]. Ce modèle hiérarchique permet de comparer entre elles un maximum de données en fonction de leur catégorie. Les critères qui doivent être pris en compte sont illustrés sur l'organigramme ci-après (fig. I-17).

Dans tous les cas, il faut préciser dans le rapport d'ACV les critères sur la base desquels le choix de données a été réalisé.

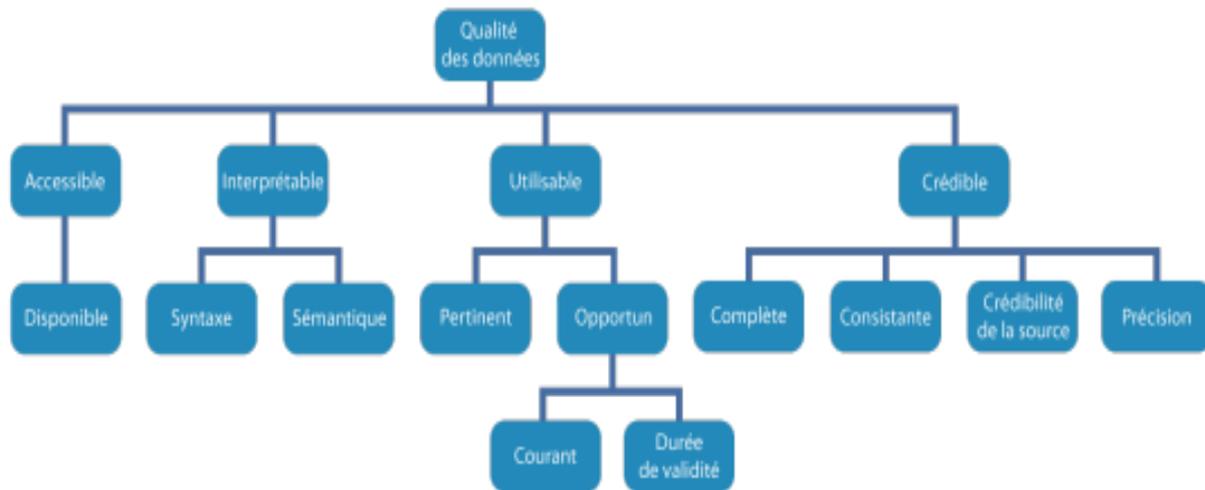


Fig. I-17 : Le modèle hiérarchique de Wang, Reddy et Kon relatif aux indicateurs de qualité des données [147]

4.8. Évaluation des Impacts du Cycle de Vie –EICV :

L'inventaire réalisé peut être traduit en deux types d'indicateurs environnementaux :

- Les indicateurs d'impacts potentiels avec la méthode **Midpoint** : des impacts changement climatique, destruction de la couche d'ozone, formation ozone photochimique, acidification, eutrophisation, écotoxicité, toxicité humaine, disparition des ressources, ...
- Les indicateurs de dommages potentiels avec la méthode **Endpoint** : des dommages sur la santé humaine, sur les écosystèmes ou sur les ressources.

On utilise le plus souvent un logiciel d'ACV pour effectuer la modélisation des indicateurs d'impacts environnementaux.

Dans certains cas particuliers, l'analyse peut être limitée à un impact donné, l'effet de serre par exemple. Il faudra alors bien s'assurer que l'impact retenu est pertinent par rapport à la finalité des travaux. Par exemple, il peut être intéressant de réaliser des bilans énergétiques et effet de serre sur les biocarburants pour les comparer avec les carburants traditionnels. Par contre, si une étude centrée sur les consommations énergétiques pourra montrer l'intérêt de telle ou telle filière de traitement des déchets par rapport à la lutte contre le changement climatique sans apporter d'éléments en faveur des problèmes sanitaires potentiels et que les préoccupations de la population sont centrées sur des problèmes de santé, ça ne sera pas une étude sur l'effet de serre qui permettra de faire évoluer les opinions... Ainsi, si l'analyse peut

être limitée à un impact donné, il faudra bien veiller à la cohérence de l'impact choisi avec l'objectif de l'étude, à ce que les justifications de ce choix soient clairement exposées dans le champ de l'étude et à ce que l'ensemble de l'étude respecte bien sûr les autres préconisations des normes ISO 14040 et 14044.

Les méthodes et les équations de calcul des indicateurs des différentes catégories d'impacts intermédiaires et finaux sont présentées dans la troisième partie de cette étude.

4.9. Méthodes d'évaluation d'impact :

Les méthodes d'analyse d'impact ont été introduites afin de relier les données d'un inventaire (ex. : substances) aux dommages environnementaux dont elles sont à l'origine. Parmi les premières méthodes permettant d'évaluer des impacts environnementaux on rappelle la méthode des volumes critiques. Cette méthode permettait de classer les émissions selon le milieu affecté, respectivement l'eau, l'air et le sol en calculant, pour chaque polluant de l'air ou de l'eau, le volume équivalent pollué jusqu'à une valeur limite. Compte tenu d'un certain nombre d'incohérences de cette méthode (ex. : la persistance des émissions et le devenir des polluants ne sont pas pris en compte) de nombreuses méthodes ont été développées ultérieurement.

En fonction du positionnement sur la chaîne reliant les causes à l'effet et selon les objectifs recherchés et l'échelle prise en compte, les méthodes de calcul des impacts sont groupées en deux catégories, respectivement :

4.9.1. Méthodes dites *mid-point* ou (méthodes orientées problèmes) :

l'impact apparaît au milieu de la chaîne de causalité) qui quantifient les effets globaux des substances émises ou consommées. Les résultats d'inventaire ayant des effets similaires sont regroupés dans des catégories d'impact appelées catégories intermédiaires, auxquelles on associe un indicateur intermédiaire (*mid-point indicator*) permettant de comparer les flux des substances contribuant à la catégorie en cause.

4.9.2. méthodes dites *end-point* ou (ou orientées dommages) :

qui estiment les dommages potentiels qui pourraient en résulter en allouant plusieurs catégories intermédiaires à une ou plusieurs catégories de dommages. Celles-ci sont ensuite représentées par des indicateurs de dommages (l'impact se trouve à la fin de la chaîne de causalité).

Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux seront traitées en détail dans au niveau du deuxième chapitre de cette étude.

4.10. Coût d'une ACV :

Les coûts et durées de réalisation sont bien entendu très variables d'une ACV à l'autre. Ils dépendent de l'ambition de l'objectif, de l'étendue du champ à étudier ainsi que de l'existence et de l'accessibilité de données d'inventaires publiques ou publiées. On notera que la diffusion de bases de données de plus en plus fournies et le développement de l'offre de prestataires, en particulier au niveau européen, conduisent globalement, depuis plusieurs années, à une baisse du prix des études (ou du moins à une amélioration de leur rapport qualité/prix). A titre d'ordre de grandeur, les coûts s'échelonnent de 10.000 à 100.000 euros pour des produits pour lesquels existent déjà des bases de données couvrant une grosse partie du cycle de vie. Si les données sont particulièrement spécifiques et jusque-là non recueillies sous forme d'inventaire, l'ACV peut dépasser la centaine de milliers d'euros. On citera un cas extrême, particulièrement lourd : la réalisation d'une ACV précise du kilowatt/heure français par EDF, en fonction de ses différentes sources (nucléaire, charbon, hydraulique, ...). Le coût de cette étude a été estimé à 700.000 euros. Pour finir, le coût de la revue critique peut grossièrement être estimé à 5 à 15 % du coût de l'étude.

4.11. Durée d'une ACV :

En matière de délais, si les études les plus simples peuvent être réalisées en quelques semaines, dès lors que le sujet est un peu plus complexe et qu'il nécessite le recueil de données et/ou la négociation d'un certain nombre d'hypothèses avec des représentants professionnels, les délais sont forcément de plusieurs mois et peuvent facilement dépasser l'année. Pour les études les plus lourdes (comparaison de produits ou de filières par exemple), nécessitant un grand nombre de représentants et la réalisation d'une revue critique multi-acteurs finale, la durée totale de l'étude peut approcher 16 à 24 mois, sachant que les délais de réalisation sont plus souvent dictés par la disponibilité des participants au projet pour se réunir et les délais de réponse aux questions et demandes de données émanant du bureau d'études que par le travail effectif du dit bureau d'études.

4.12. Utilité d'une ACV :

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'opter pour des 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, transfert qui peut être révélé et évité par une telle analyse. Dans ce cas de figure, en diminuant un impact environnemental au niveau des matières premières, on l'augmente au niveau des étapes de la fabrication et de l'utilisation (Fig. I-18).

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

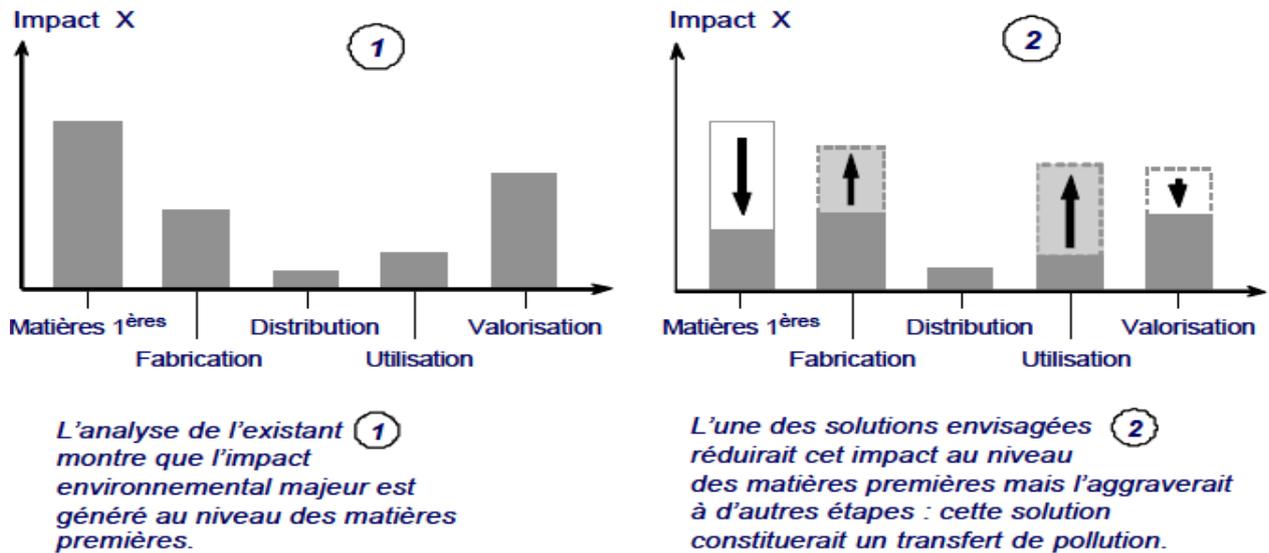


Fig. I-18 : Illustration du principe de transfert d'impacts [inspiré de [ADEME, 2011a]

L'objectif de l'ACV est de présenter une vision globale des impacts générés par les produits (biens, services ou procédés), déclinée selon différentes simulations, fournissant ainsi des éléments d'aide à la décision aux politiques industrielles (choix de conception et d'amélioration de produits, choix de procédés,...) ou publiques (choix de filières de valorisation, critères d'éco-labellisation des produits...).

L'ACV est un outil puissant et attrayant tant du point de vue de sa construction que de ses applications en terme d'aide à la décision, d'informations et de communications diverses, ses résultats reflètent la complexité des systèmes réels étudiés en les décrivant et en identifiant leurs points forts et leurs faiblesses, sans pour autant autoriser une hiérarchisation absolue des produits, filières ou procédés (outil d'aide à la décision et non outil de décision). Mais c'est souvent déjà une avancée significative que de pouvoir déceler et quantifier les points faibles d'un système et ses paramètres déterminants voire même, dans certains cas, simplement visualiser le champs de nos connaissances sur les rejets liés au système étudié de manière à initier les recherches nécessaires pour combler d'éventuelles lacunes...

4.13. Limites de l'ACV

Une Analyse de Cycle de Vie ne couvre pas l'ensemble de la problématique environnementale, seuls les aspects quantitatifs (mesurables) et extensifs (sommables) étant pris en compte : on parle dans ce cas de **comptabilité environnementale**.

Ne sont pas considérés de façon directe dans les ACV, selon la méthodologie actuellement en vigueur (et malgré le fait que certains sont mesurables), des aspects comme :

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

Il est toutefois possible d'aborder ces aspects au moyen d'outils complémentaires et grâce aux évolutions en cours des modèles qui seront également appuyées par un cumul des données et les retours d'expériences antérieures. Ceux-ci permettront l'introduction des nouveaux paramètres pour le calcul des impacts.

Une autre difficulté concerne l'interprétation des résultats d'une Analyse du Cycle de Vie et ceci ne touche pas uniquement le cercle des spécialistes concernés. Ces aspects doivent être particulièrement soignés, ainsi que leur communication.

Outre les limites conceptuelles précédemment énoncées, des limites pratiques peuvent également apparaître pour la réalisation d'une ACV. A titre d'exemple on cite ici la disponibilité des données et surtout leur collecte qui est très lourde, parfois même impossible à faire. Aussi les résultats peuvent-ils être influencés (de manière volontaire ou involontaire) par les choix faits par la personne qui a réalisé l'étude en ce qui concerne les hypothèses ou les méthodes d'analyse des impacts. La raison peut être une mauvaise connaissance par exemple de l'importance des impacts ou des différences de sensibilité aux diverses échelles géographiques.

Notons enfin que le public plus large commence à appréhender les différentes problématiques liées à l'environnement et ceci suscite également de nombreuses interrogations et insatisfactions. Parmi les questions les plus débattues :

- A quoi sert une ACV si on ne sait pas trancher au final ?

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

- Vaut-il mieux améliorer tel ou tel critère ?
- Entre l'effet de serre ou les déchets nucléaires, que choisir ?
- Dois-je polluer l'eau en nettoyant mes emballages pour favoriser leur recyclage ?

Force est de signaler qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, un consensus sur une méthode à vocation générale permettant d'appréhender de manière satisfaisante les résultats multicritères d'analyses environnementales en vue de relativiser ou hiérarchiser l'importance des différents impacts générés.

4.14. Potentialités de l'ACV

En ce qui concerne les potentialités d'une Analyse du Cycle de Vie, en raison du grand nombre d'informations fournies par ce type d'étude, elles sont très nombreuses. L'Analyse du Cycle de Vie s'intégrant dans le cadre méthodologique de l'éco-conception qui s'appuie également sur la philosophie "cycle de vie" (provenant de l'anglais : "*life cycle thinking*"), certains principes (associés parfois aux étapes du cycle de vie) ont été définis en ce contexte par le professeur de l'Université Technique du Danemark – DTU, en l'occurrence Olivier JOLLIET, respectivement :

- dématérialiser : ne pas concevoir des produits mais des services (économie de la fonctionnalité) ;
- réduire au maximum les matériaux pour obtenir la même fonction : minimiser leur diversité et les déchets, utiliser les matériaux recyclés et supprimer les toxiques. Ce principe s'applique notamment à l'étape de fabrication du produit ;
- réduire la consommation d'énergie, principalement durant la phase d'utilisation ;
- concevoir un produit réutilisable, démontable et recyclable. C'est l'étape de fin de vie qui est concernée ici, surtout dans des situations de production des quantités importantes de déchets toxiques.

5. Conclusion :

Cette partie de l'étude nous a permis de faire un cadrage théorique du projet d'étude envisagé au titre de notre thèse.

Bien qu'encadré par la norme ISO 14044, l'état de l'art a montré que la réalisation d'une analyse ACV exige énormément de rigueur, de transparence, de prudence et responsabilité. Condition sine qua none pour minimiser les éventuels écarts susceptibles de compromettre les résultats de l'étude.

Chapitre I : LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, OUTILS D'ANALYSE ET L'ACV

Dans ce sens : l'exclusion de certaines parties qui s'articule de manière forte avec le système doit être justifiée. Il en est de même pour toute démarche visant à négliger certains flux pour simplifier les calculs ce qui nécessite inévitablement des règles et des critères d'inclusion ou d'exclusion préalablement définis.

L'analyse de sensibilité, lors d'une ACV, permet de déterminer si d'autres données doivent être rajoutées ou le manque d'importance de certaines données collectées.

Par ailleurs, une revue critique de la qualité des données collectées doit être menée par l'analyste ACV.

L'anticipation sur un choix pertinent de la méthode ACV à appliquer, des sources des données (bases de données et données recueillies individuellement), du logiciel de traitement et de modélisation sont des préalables déterminants pour la réussite de l'étude ACV, d'où l'intérêt des deux chapitres qui suivent dans cette thèse.

Les contraintes de collecte de données, de délais et de coûts doivent être préalablement examinées pour éviter d'éventuelles impasses du projet d'étude ACV.

Cette partie nous a permis également de mettre en exergue les potentialités et les limites de l'approche ACV qui se perfectionne progressivement grâce aux évolutions en cours des modèles qui seront également appuyées par un cumul de données et de retours d'expériences antérieures.

Les enseignements tirés de cette partie théorique ont une importance capitale quant aux dispositions à prendre à l'effet de mener de manière efficace les étapes de notre projet de thèse, force est de noter que dans la section qui suit (chapitre II), nous nous focaliserons sur la prospection et l'étude des méthodes d'évaluation des impacts, des bases de données et des logiciels dédiés à l'ACV à l'effet de pouvoir opter pour des choix pertinents et contextualisés à nos besoins et objectifs et ce préalablement à l'entame de notre ACV comparative.

Chapitre II

Les méthodes, les bases de données et les logiciels d'ACV

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Cette section de l'étude vise à cerner, grâce à une recherche bibliographique, sitographique et webographique poussée, la majorité des méthodes, bases de données et logiciels couramment utilisables dans les études d'analyse de cycle de vie. Leurs caractéristiques, portées et limites ont été mises en exergue et mises en comparaison.

Infinie, les choix opérés mettront en interaction cohérente l'objet de l'étude ACV avec une méthode de modélisation, une base de données et un logiciel d'analyse.

1. METHODES D'EVALUATION DES IMPACTS PAR L'ACV

L'étape d'Evaluation des Impacts du Cycle de Vie (EICV ou LCIA) vise à relier chaque quantité de matière inventoriée aux impacts environnementaux potentiels correspondants selon les différentes voies d'action.

Les consommations de matières et d'énergie, les rejets et émissions dans l'air, l'eau et les sols, et la production de déchets sont quantifiés à chaque étape du cycle de vie et exprimés en termes d'indicateurs d'impacts potentiels sur l'environnement. La complexité des phénomènes en jeu et de leurs interactions est source d'incertitude sur la valeur réelle des impacts sur l'environnement (exemple : non prise en compte des effets de synergie ou d'antagonisme entre polluants, des caractéristiques particulières du milieu local, des effets de cinétique, des concentrations, des expositions) : c'est à ce titre que l'on qualifie les impacts évalués de « potentiels ». Du fait de la forte dépendance des impacts locaux (eutrophisation par exemple) aux caractéristiques du milieu récepteur, leur caractère « potentiel » est plus marqué que celui des impacts globaux (effet de serre par exemple), peu ou pas corrélés au milieu récepteur.

L'EICV implique :

- la classification (l'affectation) des données d'inventaire dans les différentes catégories d'impact, en prenant en compte les mécanismes directs, indirects, en série et en parallèle (le cas échéant en considérant la répartition des quantités inventoriées entre différentes catégories d'impact ou la répartition dans le temps) ;
- la détermination de catégories d'impacts, exhaustives et non redondantes, auxquelles contribuent les données d'inventaire recueillies,

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- l'identification de points intermédiaires, de points finaux de catégorie, d'effets ou de mécanismes le long de la chaîne cause-effet qui s'étend des quantités inventoriées jusqu'aux dommages finaux induits sur les cibles vivantes et non vivantes ;
- le choix des modèles et des facteurs de caractérisation pour quantifier l'indicateur de catégorie choisi dans l'unité de mesure appropriée.

Deux écoles de méthodes d'évaluation des impacts se sont développées [48], à savoir:

1. la modélisation des impacts s'arrête relativement tôt dans la chaîne cause-effet afin de limiter les incertitudes et se contente de regrouper les résultats d'inventaire en catégories d'impacts intermédiaires représentant des problèmes communs et qui font l'objet d'un consensus tel que «l'effet de serre» ou «l'écotoxicité » ;
2. dans la deuxième, la modélisation se poursuit jusqu'au bout de la chaîne cause-effet, à savoir jusqu'aux dommages induits sur les points finaux, moyennant des incertitudes significatives.

Jusqu'à 2002, les deux écoles demeuraient séparées et même contraposées. Suite aux résultats des groupes de travail au sein de l'UNEP (United Nation Environmental Programme), il a paru nécessaire de les rapprocher et de viser à relier de manière quantitative les résultats des points intermédiaires à ceux des points finaux de catégorie. Cela n'est pas toujours possible à cause des incertitudes qui affectent les relations de cause-effet.

La figure II-1, représente l'état de l'art de ces relations et sur laquelle apparaît des interactions significatives entre les points finaux (par exemple l'érosion des sols influence significativement l'effet de serre), les dites interactions doivent être considérées afin d'éviter une mauvaise estimation des dommages. Les liaisons incertaines sont représentées par des flèches en pointillé.

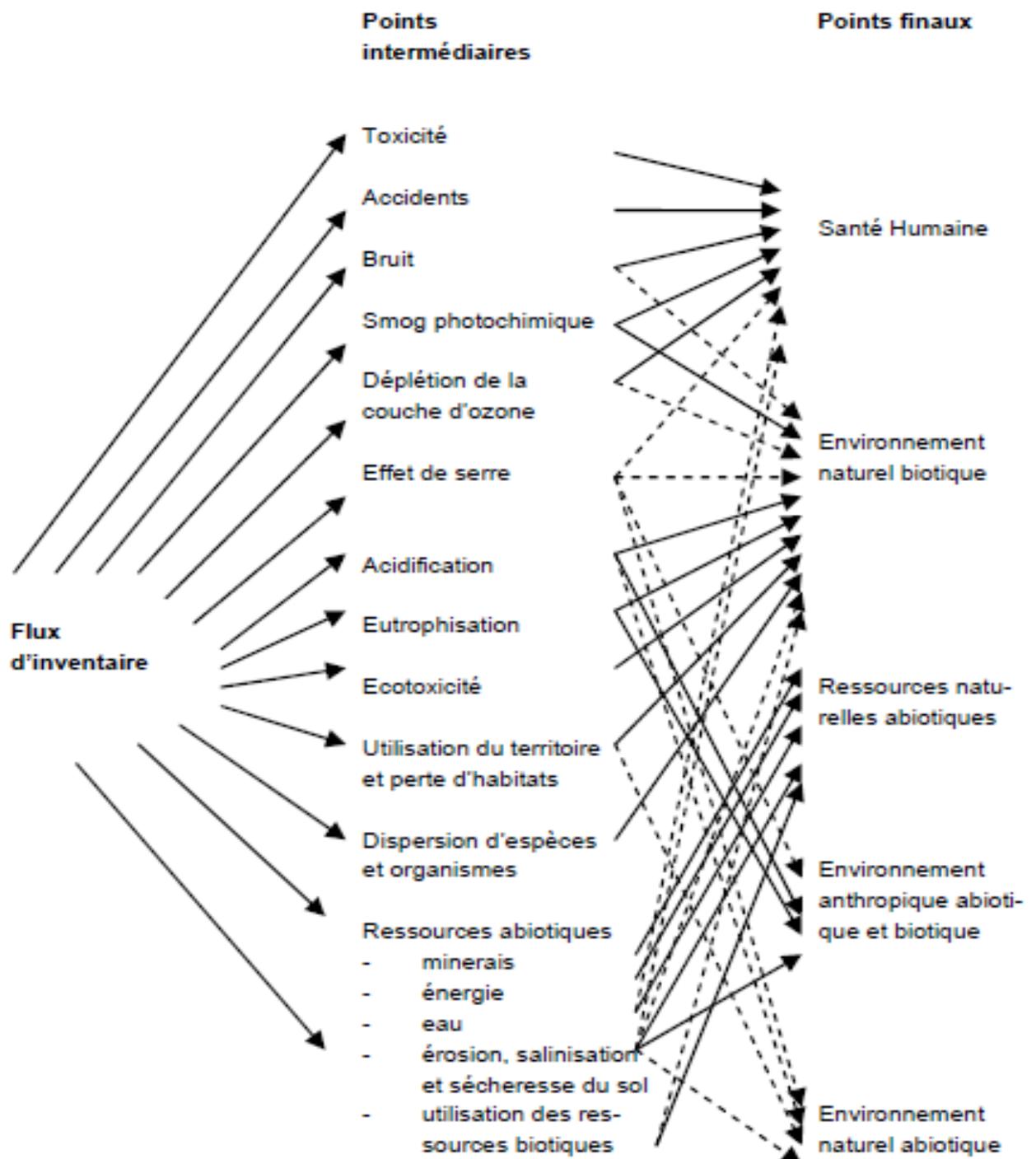


Fig. II-1 : Relations entre flux d'inventaire, points intermédiaires (problèmes) et finaux (dommages); les liaisons en pointillé sont très incertaines
Source : Source: Quantis, 2009.

Les deux écoles de méthodes se concrétisent actuellement en quatre (04) approches principales d'EICV, chacune comprenant différentes méthodes et outils d'évaluation :

- l'approche orientée problèmes – Méthode CML2002 » développée par l'institut de recherche néerlandais [49] ;

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- l'approche orientée « problèmes – Méthode EDIP » développé par l'Université Technique Danoise (DTU) [50] [51] ;
- l'approche orientée « dommages », aussi appelée « EcoIndicator99 », développée par une équipe de scientifiques néerlandais et suisses coordonnée par Pré consultants [52] ;
- l'approche « mixte » ou « Impact 2002+ », développée à l'École polytechnique Fédérale de Lausanne (l'EPFL), qui combine et utilise les outils des approches « problèmes – CML2002 » et « dommages » à l'exception de l'évaluation des impacts toxiques et écotoxiques qui se base sur une méthode originale, des améliorations ont été intégrées aux versions ultérieures « Impact 2002+ », nommée « Impact 2005 »

Des équipes de scientifiques hollandais ont développé conjointement une approche nommée « CML+EI » qui consiste à intégrer « CML2002 » et « Ecoindicator99 ».

Les méthodes d'évaluation sont très souvent implémentées sur les bases de données et permettent aux logiciels de l'ACV de traiter les données, d'opérer les calculs et d'établir les modèles et les indicateurs d'impacts en s'appuyant sur les modèles et formules de calcul fixées par les méthodes retenues par l'évaluateur.

A titre d'exemple, une quinzaine de méthodes d'évaluation d'impacts sont implémentées sur la Base de données Ecoinvent [53] :

- CML 2001 (l'Université de Leiden aux Pays-Bas) ;
- Cumulative energy demand CED ;
- Eco-indicator 99 ;
- Ecological Footprint ;
- Ecological scarcity 2006 ;
- Ecological Damage Potentiel EDP ;
- Environmental Design of Industrial Products – EDIP 1997 & 2003 ;
- Environmental Priority Strategie in Product Developpement ;
- Impact 2002 + ;
- Intergovernmental Pannel on Climate Change IPCC 2001 & 2007 (Global Warming) ;
- ReCiPe ;
- TRACI,
- USEtox ;
- Selected LCI Indicators ;

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- Ecopoints 1997 ;
- Consommation cumulée d'énergie ;
- Consommation cumulée d'exergie.

1.1. Présentation des principales méthodes de caractérisation des impacts

L'ACV est actuellement utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux d'une large gamme de processus, produits et activités industriels, de l'éco-étiquetage pour la conception de produits, à des systèmes d'énergie, à la production alimentaire et aux transports alternatifs. Elle s'étend jusqu'à l'évaluation des produits finis.

Différentes méthodes existent permettant de caractériser les flux inventoriés en indicateurs d'impact environnemental de différents niveaux :

- Les méthodes les plus reconnues et utilisées aujourd'hui permettent de caractériser les flux inventoriés en indicateurs d'impacts potentiels (ou indicateurs « midpoint »). Une dizaine d'indicateurs est alors considérée. On citera à titre d'exemple la méthode CML de l'Université de Leiden aux Pays-Bas.
- Certaines méthodes telle que la méthode Impact 2002+ permettent d'aller à un second niveau de caractérisation pour obtenir des indicateurs de dommages potentiels (ou indicateurs « endpoint »). Ces dernières méthodes permettent de faciliter la compréhension et l'utilisation des résultats en raison de la moindre quantité d'indicateurs, en général au nombre de quatre (par exemple le risque sur la santé humaine, le risque pour les écosystèmes, etc...), mais sont moins reconnues du fait d'une moindre robustesse scientifique.
- On peut aller avec certaines méthodes, telle que la méthode Eco-indicator, jusqu'à un troisième niveau de caractérisation pour obtenir un indicateur (score) unique.

Les méthodes « midpoint » ont été élaborées par des institutions académiques et de recherche et elles sont utilisées pour convertir les émissions de substances et les extractions de ressources naturelles liées à un produit ou un processus en catégorie d'indicateurs d'impact sur le niveau médian (tels que l'acidification, le changement climatique et l'écotoxicité), tandis que d'autres (méthodes « endpoint ») emploient des catégories d'indicateurs d'impact au niveau final (tels que les dommages à la santé humaine et les dommages à la qualité des écosystèmes) [54].

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Ces développements démontrent clairement qu'il n'existe pas une méthode unique applicable dans toutes les situations. Le développement d'une panoplie de méthodes de niveau médian (midpoint) et d'autres de niveau final (endpoint) pour l'évaluation des impacts du cycle de vie en est un exemple. Le tableau II-1, inventorie les principales méthodes de calcul, le type d'impacts qu'elles proposent «midpoint» ou «Endpoint» et leurs niveaux d'évaluation [55].

Tab. II-1 : les principales méthodes de calcul, le type d'impacts pris en charge «Midpoint» ou «Endpoint», leurs niveaux d'évaluation (d'agrégation).						
Méthodes européennes	Midpoint	Endpoint	Caractérisation	Normalisation	Pondération	Score Unique
ILCD 2011	X		X			
CML 2001	X		X	X		
EDIP 2003	X		X	X	X	X
ReCiPe	X	X	X	X	X	X
IMPACT 2002+	X		X	X	X	X
EcoIndicator 99		X	X	X	X	X
Méthodes nord américaines	Midpoint	Endpoint	Caractérisation	Normalisation	Pondération	Score Unique
BEES	X		X			
TRACI 2.1	X		X			
Méthodes monocritères	Midpoint	Endpoint	Caractérisation	Normalisation	Pondération	Score Unique
Ecological Footprint		X	X		X	X
IPCC 2007	X		X			
USEtox	X		X			

Nous pouvons repérer sur le tableau II-1 cinq (05) méthodes permettant de calculer l'impact environnemental à travers un indicateur global, appelé «Score unique». Il s'agit de : ReCiPe, EDIP 2003, Ecoindicator 99, IMPACT 2002+ et Ecological Footprint [56].

1.1.1. METHODE ReCiPe

Le nom ReCiPe revêt un double sens :

- Le terme « RECIPE » est le synonyme anglais de « Recette », d'où cette méthode prévoit une « recette » pour les calculs de l'analyse d'impact dans le cycle de vie ;
- RECIPE est, également, un acronyme des principaux contributeurs soient : RIVM, l'Université Radboud, CML et PRé Consultants [54]. Ce qui signifie que ReCiPe est une méthode de calcul d'impact développée sur la base d'un regroupement d'autres méthodes dont CML 2001 et Ecoindicateur 99.

Par ailleurs, ReCiPe détermine les indicateurs à deux niveaux, les indicateurs midpoint et ceux endpoint en sus de la possibilité d'agréger en un score unique.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Avec cette méthode, l'utilisateur peut choisir le niveau de progression dans la recherche des résultats d'évaluation :

1. Dix-huit indicateurs «midpoints» identiques à ceux identifiés dans la méthodologie CML :
Le changement climatique, l'acidification, l'eutrophisation, etc.
2. Trois indicateurs «endpoint» d'une certitude limitée. Les indicateurs endpoint sont les mêmes que ceux retenus par la méthodologie Éco-indicateur 99 [57] à savoir: Dommages à la santé humaine, la qualité des écosystèmes et l'épuisement des ressources.

La méthode ReCiPe est implémentée sur plusieurs logiciels d'ACV et les Bases de données les plus utilisés comme le logiciel SIMAPRO et la Base de données ECOINVENT.

1.1.2. CML 2001 :

La méthode CML a été développée en 2001 par le centre des sciences environnementales de l'Université de Leiden aux Pays-Bas. CML s'appuie sur des normes européennes et aborde les indicateurs environnementaux les plus courant pour l'analyse du cycle de vie (ACV).

La méthode d'évaluation CML est utilisée particulièrement par les logiciels :

- SOLIDWORKS, versions antérieures à 2013 ;
- Bilan Produit de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie - France).

CML 2001 (V2.054) une l'une des méthodes les plus reconnues, éprouvées et mise à jour régulièrement. Elle est la plus exhaustive pour la caractérisation des impacts sur l'eutrophisation des milieux aquatiques (marins et eaux douces).

Ladite méthode englobe une «approche problèmes» et une « approche dommages ».

La méthodologie est assortie d'une base de données CML-IA et elle regroupe les résultats de l'ICV en catégories d'impacts intermédiaires, selon différent thèmes.

Les résultats se présentent sous la forme d'un tableur qui présente les facteurs de caractérisation pour plusieurs milliers de flux. Aussi des logiciels spécialisés en ACV facilitent son utilisation [58].

La méthode prend en charge l'établissement d'un large éventail de catégories d'impacts, à savoir :

- Catégorie d'impacts obligatoire (catégorie des indicateurs utilisés dans la plupart des ACV).

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- Catégorie d'impacts supplémentaires (indicateurs opérationnels existants, mais qui ne sont pas souvent inclus dans les études ACV).

Afin d'appliquer CML à l'inventaire du cycle de vie extrait de la base de données Ecoinvent par exemple, il est nécessaire d'affecter les facteurs de caractérisation retenus par la méthode aux flux élémentaires de ressources et de polluants déclarés dans cette base de données.

Autrement dit, le travail de l'Analyste consiste à relier les facteurs d'évaluation d'impact proposé pour l'approche axée sur les problèmes dans le cadre de la méthode CML 2001 aux données Ecoinvent.

Parmi les 17 catégories d'impacts intermédiaires considérées par la méthode [59] seulement les catégories suivantes sont couramment utilisées :

- Déplétion des ressources abiotiques, Réchauffement global (effet de serre) et Déplétion de l'ozone stratosphérique ayant une échelle globale,
- Oxydation Photochimique, Acidification, Eutrophisation, ayant une échelle régionale,
- Impacts liés à l'utilisation du territoire, Toxicité, Ecotoxicité ayant une échelle locale.

Les indicateurs d'impact de chaque catégorie sont quantifiés pour chaque substance par un modèle de caractérisation pour ensuite calculer et regrouper les indicateurs partiels en un seul indicateur de la catégorie (par exemple le GWP pour l'Effet de Serre).

Les facteurs sont des ratios de résultats des indicateurs pour une émission donnée de la substance considérée (par exemple de CH₄) et de résultats pour la même émission d'une substance de référence différente pour chaque type d'impact (par exemple le CO₂ pour l'Effet de Serre).

Les indicateurs et les facteurs sont linéaires par rapport aux quantités de substances inventoriées. L'impact induit par n émissions inventoriées pour chaque catégorie d'impact c est calculé selon l'expression suivante :

$$I_c = \sum_i^n m_i \cdot CF_{c,i}$$

I_c = impact relatif à la catégorie d'impact c issus de l'émission de n substances pour un cycle de vie donné [kg],

m_i = masse de substance i inventoriée dans le processus en [kg]

$CF_{c,i}$ = facteur de caractérisation de l'impact c relatif à la substance i , [adimensionnel]

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

1.1.3. IMPACT 2002+ :

IMPACT 2002+ est une méthodologie d'évaluation des impacts initialement développée à l'Institut Fédéral Suisse de Technologie de Lausanne (EPFL). La méthodologie actuelle propose la mise en œuvre d'une évaluation réalisable par une approche combinée impacts intermédiaires et dommages (impacts finaux) [60], reliant l'ensemble des résultats de l'inventaire du cycle de vie (flux élémentaires et autres interventions) via quatorze (14) catégories d'indicateurs intermédiaires qui seront par la suite agrégés en quatre (04) catégories de dommages [61].

La méthode « impact 2002+ » est, donc, basée sur une approche « mixte », regroupant un ensemble d'indicateurs d'impact, de facteurs de caractérisation et de modèles de calculs permettant d'avoir des indicateurs d'impact (pour chaque catégorie) aux points intermédiaires et finaux de la chaîne de causalité.

Les facteurs de caractérisation de la toxicité humaine et de l'écotoxicité (aquatique et terrestre) sont extraits de la méthodologie IMPACT 2002 relative à l'évaluation de l'impact des produits chimiques toxiques, par contre les facteurs de caractérisation pour les autres catégories sont adaptés à partir des méthodes de caractérisation existantes à savoir Eco-indicator 99, CML 2001, le GIEC et la demande énergétique cumulée.

La méthode IMPACT 2002+ fournit des facteurs de caractérisation pour près de 1500 résultats d'inventaires de cycle de vie différents.

IMPACT 2002+ est compatible avec la majorité des logiciels ACV [60] tels SIMAPRO, GaBi, Quantis SUITE 2.0,...

1.1.4. Eco-Indicator 99 (EI 99)

La méthode «Eco-indicateur 99 » a été publiée en 1999. Les impacts sont représentés par les nombres ou « score » qui expriment l'impact environnemental d'un procédé ou d'un produit par l'analyse des charges environnementales tout au long de leur cycle de vie.

La définition des scores s'appuie sur des travaux d'auteurs ayant travaillé en collaboration avec 350 experts suisses et néerlandais sur l'ACV.

Afin de l'appliquer dans la phase d'inventaire du cycle de vie de la base de données (Ecoinvent), il est nécessaire d'attribuer les facteurs de dommages aux flux élémentaires des ressources et des

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

polluants déclarés à partir de la base de données. Le travail vise à relier la méthode d'évaluation d'impact Eco-indicateur 99 aux données de la base Ecoinvent. Cette approche « dommages » considère 12 catégories de dommage [52].

1. Effets cancérigènes sur l'homme,
2. Effets sur les capacités respiratoires des hommes dus aux substances organiques,
3. Effets sur les capacités respiratoires des hommes dus aux substances inorganiques
4. Dommages à la Santé dus aux changements climatiques,
5. Dommages à la Santé dus aux radiations ionisantes,
6. Dommages à la Santé dus à la déplétion de la couche d'ozone,
7. Dommages à la Qualité des Écosystèmes dus aux émissions écotoxiques,
8. Dommages à la Qualité des Écosystèmes dus aux effets combinés de l'acidification et de l'eutrophisation,
9. Dommages à la Qualité des Écosystèmes dus à l'occupation du territoire,
10. Dommages à la Qualité des Écosystèmes dus à la transformation du territoire,
11. Dommages aux Ressources dus à l'extraction des minerais,
12. Dommages aux Ressources dus à l'extraction des combustibles fossiles.

Les indicateurs de catégorie sont les suivants :

- pour les catégories de « dommages à la Santé » :

- le nombre d'années de vie perdus (YLL = Years of Life Lost) et le nombre d'années de vie pendant lesquels la santé est affectée (YLD = Years of Life Disability) combinés dans l'indice DALY (Disability Adjusted Life Years).

- pour les catégories de « dommages à la qualité des écosystèmes » :

- la fraction (la pourcentage) de plantes vasculaires qui ont potentiellement disparu dans une certaine aire (PDF Potentially Disappeared Fraction of Species) à cause de l'acidification, l'eutrophisation et l'utilisation du territoire induites par l'émission marginale de substance inventoriée ;
- le pourcentage d'organismes exposé à une concentration plus élevée du PNEC (La concentration estimée sans effet - PNEC est la concentration d'un produit chimique qui marque la limite à laquelle aucun effet nocif de l'exposition dans un écosystème n'est mesuré) suite à l'émission marginale de substance inventoriée (PAF Potentially Affected Fraction of Species), le PAF étant ensuite transformé en PDF en le divisant par 10.

- pour les catégories de dommages aux Ressources :

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- la qualité des ressources après exploitation, exprimée par l'énergie supplémentaire qu'il sera nécessaire de produire pour continuer à extraire dans le futur la même quantité de ressources inventoriée actuellement.

Ces indicateurs sont quantifiés par le moyen de modèles de caractérisation analysant le devenir des substances dans l'environnement, les effets sur les cibles et les dommages induits par rapport à une émission unitaire de substance. Afin d'obtenir le résultat de dommage pour chaque catégorie, on multiplie les quantités inventoriées par ces indicateurs :

$$I_c = \sum_i^n m_i \cdot \text{dommage}_{c,i}$$

Avec,

I_c = impact relatif à la catégorie de dommage c issus de l'émission de n substances, [DALY] ou [PDF.m2.an] ou [MJ]

m_i = masse de substance i inventoriée dans le processus du cycle de vie du scénario considéré, [kg]

dommage c, i = résultat de l'indicateur de catégorie de dommage c relatif à la substance i , [DALY/kg] ou [PDF.m2.an/kg] ou [MJ/kg].

Il y a lieu de souligner que cette méthode résout deux problèmes [62]:

- Le premier problème consistait en l'absence de coefficients similaires qui permettent d'interpréter une analyse de cycle de vie complète. A cette fin, la méthode permet de calculer à partir de coefficients de pondération, une seule valeur pour l'impact environnemental total.
- Le deuxième problème était la complexité et/ou l'absence des données environnementales suffisantes.

Éco-indicateurs 99 permet de qualifier :

- La production de matériaux : La détermination de l'indicateur écologique pour tous les procédés d'obtention et production de matériaux, qui va depuis l'extraction des matières premières jusqu'au dernier stade de la production. Les différents transports jusqu'à l'étape finale de la chaîne de production sont également pris en compte. L'éco-indicateur est exprimé donc en millipoints par kilogramme de matière.
- Les procédés de production : Les éco-indicateurs pour les procédés de production concernent les émissions provenant du procédé lui-même et les émissions des procédés de production d'énergie qui sont nécessaires. Chaque traitement est exprimé dans l'unité

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

appropriée au procédé particulier (millipoints par kilogramme, mètre carré, mètre linéaire de soudage, etc.).

- Le transport : Les éco-indicateurs prennent simultanément en compte l'impact des émissions causées par l'extraction et la production de carburant et la production d'énergie à partir de combustible pendant le transport. Ils sont exprimés en millipoints par tonne transportée par kilomètre.
- L'Energie : les indicateurs de l'énergie se rapportent à l'extraction et la production de carburants et de conversion d'énergie et la production d'électricité. Une efficacité moyenne est utilisée. Ils sont exprimés par KWh demandé.

Un éco-indicateur particulier a été déterminé pour l'électricité à haute tension, destinée aux procédés industriels, et aussi pour l'électricité basse tension, en particulier pour les ménages et à petite échelle pour la consommation d'énergie industrielle. (Exprimé en électricité et chaleur)

- Le traitement et le recyclage des déchets : Différents scénarios ont été prévus pour l'incinération, l'enfouissement et le recyclage des produits.
 - Déchets domestiques : le scénario des déchets domestiques est basé sur le traitement des déchets dans le ménage moyen en Europe ;
 - Déchets municipaux : il est supposé qu'une certaine proportion est mise en décharge et que le reste est incinéré ;
 - Recyclage : le recyclage des produits provoque une charge environnementale comme tous les autres processus, mais les processus de recyclage peuvent conduire également à des produits utiles. Ces produits impliquent un gain environnemental car ils évitent la production des produits remplacés par le recyclage ;

Certains scénarios d'élimination conduisent à des chiffres négatifs. Cela se produit lorsque le traitement de déchets se traduit par un sous-produit utile qui peut être recyclé ou réutilisé [63].

La méthode de calcul d'éco-indicateurs 99 est une méthode rapide pour calculer des impacts environnementaux d'un produit ou d'un service. Elle est facile à utiliser, à interpréter. Elle

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

offre au concepteur une vision du poids environnemental du produit à partir d'indicateurs environnementaux.

1.1.5. TRACI

Cette méthode a été développée en 2003 par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) à l'issue d'un projet de recherche baptisé TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts* – Outil pour la réduction et l'évaluation des produits chimiques et d'autres impacts environnementaux).

La méthode TRACI est basée sur les paramètres d'entrée américains et les conditions en vigueur aux Etats-Unis et peut être utilisée pour modéliser précisément des études ACV en Amérique du Nord. La méthodologie est intégrée à la base de données Ecoinvent.

1.1.6. EDIP

La méthode EDIP a été développée en 1997 et en 2003. EDIP est l'abréviation de « Environmental Design of Industrial Products ». Cette méthode est le résultat d'un projet de recherche mené en collaboration entre l'Université Technique du Danemark, plusieurs entreprises de l'industrie danoise ainsi que l'agence de protection de l'environnement danoise. Le rapport final du projet a été publié en 1997 et un second rapport avec une information scientifique plus détaillée concernant les différents facteurs d'impact est paru l'année suivante [50].

Afin d'utiliser cette méthode avec les données d'une base comme Ecoinvent, les facteurs d'équivalence de la méthode EDIP 97 doivent être liés à des flux élémentaires respectifs au sein de Ecoinvent.

En 2003, la méthode évolue et inclut la modélisation spatiale des facteurs de caractérisation. toutefois, EDIP 1997 n'est pas remplacé par EDIP 2003. Ce sont deux méthodes développées sur la même base mais aboutissant à des informations différentes.

Les facteurs de caractérisation de EDIP 2003 prennent en compte une plus grande part de la chaîne de causalité et ce pour toutes les catégories d'impacts, ce qui comprend donc la modélisation de la dispersion de la substance et l'augmentation de l'exposition subséquente. Pour un certain nombre de catégories d'impact, la modélisation comprend également les antécédents d'exposition et la vulnérabilité des systèmes-cibles pour permettre l'évaluation du dépassement des seuils. En ce sens que la pertinence environnementale des impacts calculés est supérieure. En effet, en tenant compte du système-cible, les impacts évalués reflètent plus fidèlement les effets réels sur l'environnement à

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

partir des substances observées. De plus, ils sont plus faciles et plus sûrs à interpréter en termes de dommages environnementaux. Les facteurs de caractérisation et les nouvelles références de normalisation ont été développés pour plusieurs impacts environnementaux :

- acidification
- eutrophisation terrestre
- exposition à l'ozone photochimique des plantes
- exposition à l'ozone photochimique des êtres humains
- aquatiques eutrophisation
- toxicité humaine via l'exposition de l'air
- écotoxicité

Pour les catégories d'impacts à l'échelle mondiale comme le réchauffement climatique et l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, les facteurs de caractérisation sont mis à jour avec les dernières recommandations du GIEC, de l'OMM et le PNUE.

L'approche « problèmes » adoptée considère 9 catégories d'impact [50] :

- Consommation des ressources, Réchauffement global (effet de serre), Déplétion de l'ozone stratosphérique ayant une échelle globale,
- Oxydation Photochimique, Acidification, Eutrophisation, Toxicité, Ecotoxicité, ayant une échelle locale.

Les indicateurs d'impact des catégories Réchauffement global (effet de serre), Déplétion de l'ozone stratosphérique, Oxydation Photochimique sont quantifiés pour chaque substance par le moyen des mêmes modèles de caractérisation que pour l'approche problème CML2002.

La normalisation est incluse par l'application d'un ensemble de facteurs de normalisation médiane «midpoint» obtenus à partir des statistiques pour l'année de référence 2000 [64].

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

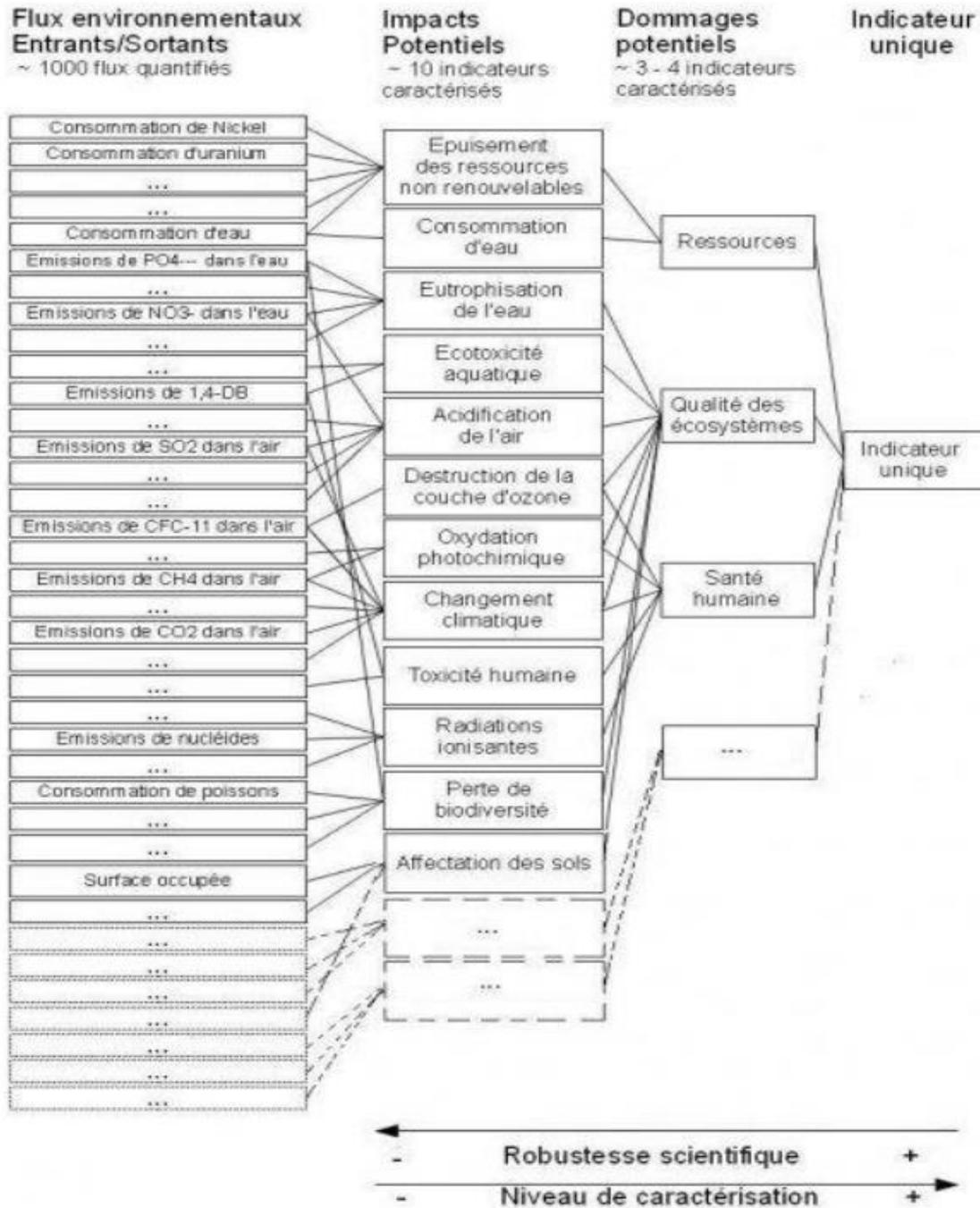


Fig. II-2 : les trois niveaux d'évaluation d'impacts (Problèmes potentiels, dommages potentiels et score unique) [148]

Ce panorama relatif aux méthodes d'ACV nous a permis de renforcer la pertinence des choix à opérer au regard du projet de l'étude ACV prévue au titre de cette étude.

Ecoindicator 99 et CML disponible sur la Base de donnée Ecoinvent sont, de notre point de vue, les deux méthodes couvrant un large éventail d'indicateurs d'impacts environnementaux ciblés par cette étude tout en garantissant des résultats fiables, par conséquent elles vont cadrer la recherche, la

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

détermination et la modélisation des catégories d'impacts intermédiaires, des catégories de dommages ainsi que les scores uniques qui pourraient être considérés lors de notre analyse comparative du cycle de vie des systèmes d'éclairage public. A rappeler que des scientifiques néerlandais ont développé conjointement une approche nommée « CML+EI » qui consiste à intégrer « CML2002 » et « EI99 ».

La mise en œuvre des méthodes en question s'appuie sur l'utilisation d'une Base de données et d'un logiciel qui seront identifiés à la fin des deux prochaines sections.

2. BASE DE DONNEES D'ACV

L'intérêt croissant pour l'efficacité environnementale et les avancées réalisées dans le domaine de la recherche écologique a engendré progressivement un besoin en informations techniques sur les procédés de production et les produits dans les domaines d'activités professionnelles primaires secondaires et tertiaires.

Il en est ainsi pour l'évolution de la réglementation environnementale de certains pays qui impose, dans un souci de conformité, des obligations aux producteurs pour fournir des données propres à leurs produits sous forme de Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires...

Ces aspects ont abouti avec le temps à l'accumulation d'un volume important et varié de données techniques et industrielles ayant incité plusieurs Etats à concevoir une stratégie de gouvernance des données en question.

Dans ce cadre, les Etats de l'union européenne, ont mis en place, depuis les années 90, des lois et des règlements visant la production, le stockage, l'économie et l'accès aux données informatisées. Les dispositions afférentes à la réglementation sur les données à supprimer et les obstacles à l'accès aux données, tant pour les organismes du secteur privé que pour les organismes du secteur public, tout en préservant les incitations à investir dans la production de données en assurant un contrôle équilibré des données pour leurs créateurs.

Les mécanismes, les processus, les attributions et les structures destinés à faciliter la création des bases de données et le partage de données par les entreprises, les particuliers et le secteur public sont également fixés par lesdites dispositions.

Indépendamment des multiples avantages liés à la disponibilité des données, ces dernières contribueront à l'amélioration de l'efficacité des entreprises et de la fabrication entraînant ainsi le renforcement continu des performances énergétiques et environnementales des matériaux, articles, services et produits par une réduction, par exemple, des déchets, de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

2.1. Avantages de disponibilités des données pour les pouvoirs publics, milieux académiques et scientifiques

Le règlement sur les données vise à obliger les entreprises de tous les secteurs d'activité à produire et fournir, sous un formalisme précis, des données en relation avec leur propre activité et vise également à libérer la valeur des données provenant d'entreprises dans des situations exceptionnelles d'intérêt public élevé dans, par exemple, des circonstances visant à prévenir ou surmonter une urgence publique ou pour remplir un mandat d'intérêt public imposé par la loi.

Ces nouvelles règles devraient fortement améliorer la prise de décision fondée sur des données probantes, en particulier l'efficacité et la rapidité de la réaction aux crises telles que les catastrophes naturelles, les inondations et les incendies...

Par ailleurs, la communauté académique et les milieux de recherche scientifique auraient davantage d'opportunités d'accès aux données et informations susceptibles d'alimenter des projets d'études visant à remédier à des problématiques techniques, environnementales, énergétiques, économiques et sociologiques et par la même occasion booster les évolutions et les innovations techniques, technologiques et industrielles.

Grace à la profusion de données industrielles et aux règlements fixant les modalités de production, de stockage, de traitement et de partage des données, une forte économie numérique apparaîtra qui sera d'un appui caractérisé pour le développement technique et scientifique.

Les données stockées sur des bases de données et des plateformes dédiées et spécialisées par branches d'activités professionnelles permettront à de nombreuses personnes d'y accéder en même temps, et elles peuvent être consommées à de multiples reprises et de diverses manières sans que cela nuise à leur qualité et sans risque d'épuisement de la ressource. Le volume des données est en constante augmentation et devrait passer de 33 zettaoctets en 2018 à 175 zettaoctets en 2025 (1 Zo (Zettaoctets) équivaut à 1000000000000 Go (Gigaoctets)). Le volume de données disponibles devrait générer 270 milliards d'euros d'ici à 2028. Along terme, ces données seront la substance de base de l'intelligence artificielle. Dans le domaine écologique, l'estimation de la plupart des impacts environnementaux impose de connaître les processus structurant des étapes du cycle de vie des produits et service, des quantités des matériaux et substances y entrant et sortant... ce qui impose aux acteurs de cette typologie d'études des efforts considérables pour recueillir des données pertinentes.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

L'appropriation d'un volume important de données environnementales a laissé apparaître des gestionnaires de données institutionnels et privés et à la création de base de données informatisées utilisant des plateformes puissantes rendant l'interaction avec les usagers plus fluide via le réseau Internet.

Les données informatisées à archiver obéissent à des normes et des procédures fixant les exigences liées à la collecte, la vérification, la mise en forme, le stockage et la mise à jour continue.

Dans ce cadre une multitude de bases de données dédiées à l'Analyse du Cycle de Vie et à l'Eco-conception a été créée dans différents endroits du monde.

La difficulté d'exploitation, d'utilisation et de traitement de quantités volumineuses de données à l'effet de mener des études d'analyse du cycle de vie ou de conception a poussé les spécialistes de créer des logiciels dédiés, souvent appelés les logiciels d'ACV et/ou d'Eco-conception.

De par les efforts des créateurs de Bases de données et des éditeurs de Logiciels, des exigences et des paramètres de compatibilité ont été définis ce qui permet aux logiciels d'accéder aux bases de données et d'en faire les interactions et les traitements nécessaires.

Certains éditeurs de logiciels disposent de leurs propres Bases de données.

Le schéma, ci-dessous illustre la place qu'occupe les bases de données ainsi que les logiciels d'ACV et les méthodes de modélisation dans le démarche globale d'une étude ACV.

Ce chapitre vise à présenter une panoplie de Bases de données et de Logiciels d'ACV et d'Ecoconception ainsi que leurs portées et leurs limites.

L'objectif étant de pouvoir opter pour un choix pertinent répondant au périmètre du projet de notre ACV comparative des systèmes d'éclairage public.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

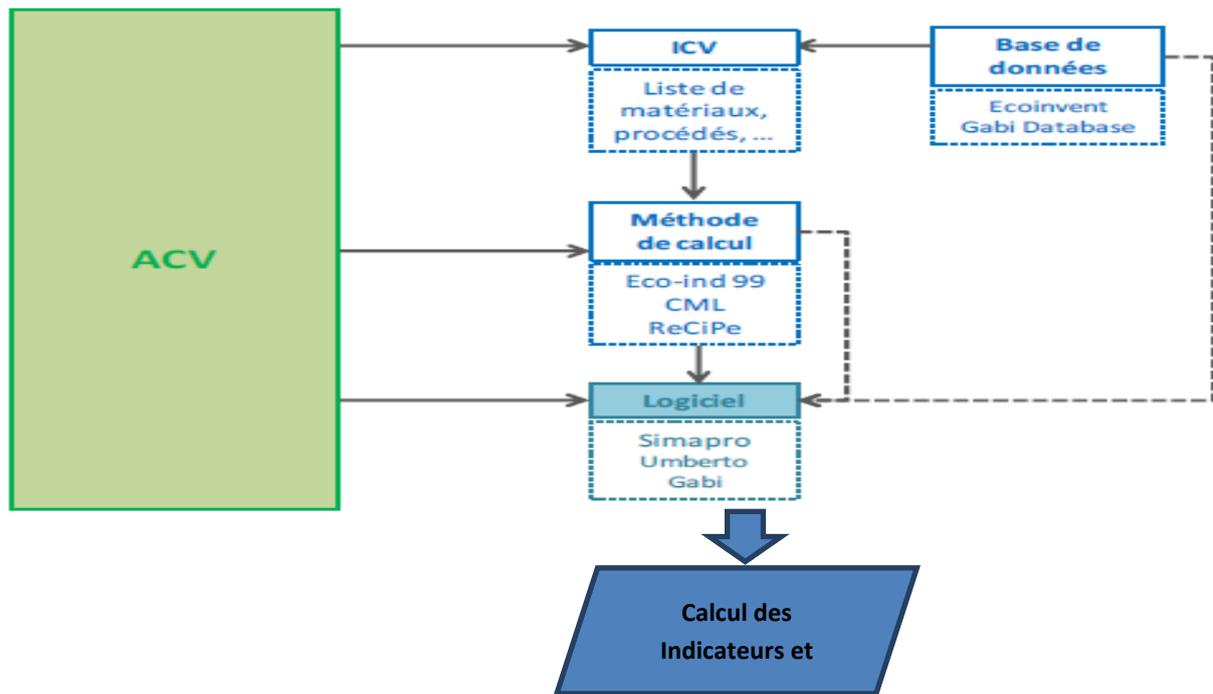


Fig.II-3 : Place des Bases de données, méthodes de calcul et logiciels dans une étude d'ACV

Les bases de données représentent par leurs contenus la ressource de la substance essentielle utilisée par les logiciels d'ACV pour calculer les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service. Ce sont généralement des fichiers tableurs dans lesquels sont stockées toutes les informations concernant les données liées à des matières, matériaux, produits et processus enregistrées lors de leur conception sous des formats standards appliqués aux données en question.

Certaines bases de données sont polyvalentes et fournissent des données provenant de divers secteurs d'activités toutefois, il existe des bases de données spécialisées dans des domaines d'activités bien précis.

Les bases de données sont généralement alimentées par les données produites par les organismes internationaux, les entreprises et les sociétés de traitement et de fabrication des matériaux, produits et équipements, les laboratoires de recherche, les bureaux d'études et les experts de différents domaines.

Par ailleurs, la réglementation propre à certains Etats fixe des obligations aux producteurs pour fournir des données propres à leurs produits sous forme de Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires...

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

2.1.1. La Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire :

Une FDES est une Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire. Cette déclaration est établie sous la responsabilité des fabricants (ou syndicat professionnel) du produit. On qualifie alors cette donnée de spécifique. Depuis novembre 2022, la norme NF EN 15804+A2 et son complément national NF EN15804+A2/CN fournit la méthode d'obtention et le format de déclaration des informations environnementales et sanitaires. Les FDES préexistantes seront mises en conformité progressivement.

Renseigner une FDES implique de disposer d'une analyse du cycle de vie (ACV) du produit (il s'agit d'un bilan environnemental très détaillé) et d'informations sanitaires résultant souvent d'essais spécifiques.

2.1.2. Profil Environnemental Produit :

Un PEP ou Profil Environnemental Produit est une déclaration environnementale d'un équipement électrique, électronique ou de génie climatique basé sur les résultats de son analyse de cycle de vie. La norme NF XP C08-100-1 et le PCR ed.3 (Product Category Rules) définissent les règles d'élaboration des PEP. Il est déclaré sous la responsabilité du fabricant (ou syndicat professionnel). Les données sont qualifiées de spécifiques.

Les PEP offrent des informations multicritères, objectives, quantitatives et qualitatives relatives à une fonction et une durée de vie du produit dans l'ouvrage.

Chaque PEP contient :

- Une caractérisation de l'équipement : constituants, produits complémentaires pour la mise en œuvre, emballages, ... ;
- L'unité fonctionnelle du produit et sa durée de vie ;
- Son profil environnemental : un ensemble d'indicateurs environnementaux calculés sur l'ensemble du cycle de vie du produit ;
- Ainsi que l'identité de l'émetteur de fiche PEP.

Ces déclarations permettent à tout fabricant de :

- Anticiper les obligations réglementaires
- Prouver la performance environnementale d'un équipement
- Outiller une démarche d'éco-conception
- Assurer la transparence des déclarations environnementales

Les FDES et les sont des outils utilisés actuellement pour alimenter les bases de données de l'ACV.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

2.2. Présentation des bases de données de l'ACV

Ci-dessous, sont présentées quelques bases de données dédiées à l'ACV

2.2.1. ECOINVENT :

Ecoinvent est un Centre de compétences d'Agroscope, de l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche), de l'EPF (Ecole Polytechnique Fédérale) Lausanne, de l'EPF Zurich et de l'Institut Paul-Scherrer. Avec plusieurs milliers d'inventaires environnementaux et plus de 6000 utilisateurs.

Ecoinvent se considère comme une base de données leader mondial pour les inventaires environnementaux des analyses de cycle de vie. Elle constitue le fondement des projets d'analyses de cycle de vie, d'écoconception ou des informations environnementales sur les produits.

Toutes les données sont établies sur le niveau "procédé unitaire" qui représente l'unité la plus petite, avec ses entrées (énergie et matière) et sorties (émissions, déchets) directes, à l'exception de la filière plastiques.

Le contenu de la base de données Ecoinvent est structuré en plusieurs catégories :

- Données relatives aux métaux, aux matériaux de construction, au bois, matières plastiques, produits chimiques, etc.. Ces données sont fournies par l'"EMPA", qui est une institution de recherche se consacrant à la science des matériaux et aux développements technologiques ;
- Données provenant des diverses institutions et qui sont relatives aux biocarburants, à la climatisation, aux méthodes de cogénération ou encore aux matières premières renouvelables ;
- Données relatives à l'approvisionnement (infrastructures, transports) et à la production d'énergie calorifique (en brûlant des carburants tels que le gaz naturel) et/ou électrique ;
- Données relatives à l'agriculture ;
- Données concernant le traitement des déchets ;
- Autres...

La nouvelle version 3.0, parue en 2013, représente un jalon supplémentaire de l'analyse du cycle de vie, dans la mesure où: de nouvelles données ont été mises à jour et intégrées, notamment dans les domaines de la production chimique, des denrées alimentaires et des légumes, ainsi que dans celui de l'électricité en offrant plus de possibilités d'application aux utilisateurs d'Ecoinvent.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Les utilisateurs de la base sont également des fournisseurs de données qui contribuent à l'internationalisation de la base en l'alimentant par des flux de données provenant du monde entier. La fiabilité et la qualité des données est garantie grâce au contrôle minutieux assuré par Ecoinvent. Elle est la base de données d'inventaires environnementaux, la plus complète et la plus utilisée dans le monde.

La base de données ECOINVENT permet d'accéder à des processus couvrant différents domaines industriels. Elle permet de réaliser des études à différents niveaux de détails [65]:

- Etudes prospectives pour obtenir des réponses initiales de base ;
- Etudes à court terme pour la prise de décision interne;
- Etudes approfondies selon les exigences de la norme ISO-14040/14044.

ecoinvent trouve son utilisation dans une large gamme d'études environnementales :

- Evaluation du cycle de vie ;
- Gestion du Cycle de Vie ;
- Evaluation de l'empreinte carbone ;
- Evaluation de l'empreinte eau ;
- Suivi de la performance environnementale ;
- Conception et éco conception des produits ;
- Déclarations environnementales de produits.

La base de données ECOINVENT est intégrée et vendue avec les principaux logiciels d'ACV comme OPENLCA, UMBERTO®, GABI® et SIMAPRO®. La base est en constant développement, enrichissement et mise à jour de façon communautaire.

Elle est également en lien direct et compatible avec la majorité des méthodes d'ACV [66].

L'utilisateur trouve, dans le modèle répartition «Ecoinvent default», une définition globale des procédés recherchés, des observations générales, la date de publication au sein d'ecoinvent, le coût et, bien sûr, un indicateur global d'impact dans différentes méthodes de calcul comme Éco-indicateurs 99 et ReCiPe.

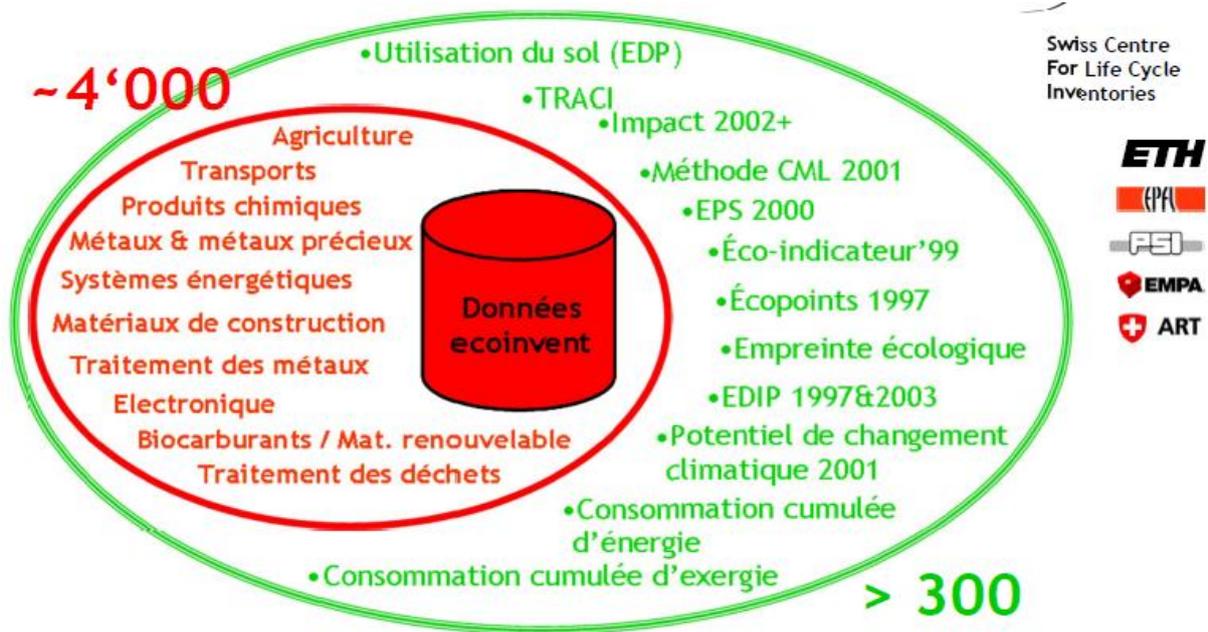


Fig. II-4 : Domaines d'activités et compatibilité d'Ecoinvent avec les méthodes ACV
 Source : <https://ecoinvent.org/>

La version 3.0 dispose également d'une nouvelle structure qui lui permet de mieux tenir compte des différences géographiques. La version 3.9.1, publié en décembre 2022, d'Ecoinvent apporte les dernières données disponibles dans les secteurs économiques clés en élargissant la couverture sectorielle et géographique.

l'usage et la reconnaissance de Ecoinvent par les utilisateurs en font le leader incontestable sur le plan mondial. Une grande majorité des logiciels d'Analyse de Cycle de Vie l'intègrent en raison de la transparence prouvée en ce qui concerne la provenance des données utilisées ainsi que leur mode d'obtention, d'évaluation ou d'intégration dans les calculs. Les données proposées via un site internet sont évaluées par des experts indépendants et se basent exclusivement sur des informations industrielles provenant pour la plupart :

- de groupements tels que PlasticsEurope, FEFCO (groupement d'industriels d'emballages tels que le carton et le papier) ;
- de rapports internationaux établis par des experts sur des nombreuses technologies ;
- de statistiques nationales de l'électricité et de l'énergie;
- de rapports environnementaux des associations et des entreprises ;
- de publications scientifiques reconnues.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

2.2.2. GABI DATABASE :

La base de données GaBi est la propriété de « Sphera Solutions GmbH ». Elle a joué un rôle pionnier dans l'ACV et repose sur une expertise scientifique et des données empiriques récoltées depuis plus de 20 ans. Les données GaBi sont conformes à la norme ISO 14040. GaBi Database est constituée d'un ensemble d'impacts environnementaux (Liste de données : flux consommés, émis et catégorisés) validé par des experts, obtenu grâce à une combinaison entre l'expérimentation scientifique et des résultats empiriques obtenus sur le terrain [67]. Ainsi, GaBi Database utilise un modèle de données industrielles réelles agrégées issues de sociétés de traitement et de fabrication des matériaux [68]. Avec plus de 8.400 Inventaires de Cycle de vie (LCI), l'ensemble de données est basé sur des processus industriels réels. Depuis 2013, chaque année, tous les contenus des bases de données GaBi LCA sont entièrement rafraîchis et mis à jour. Les données sont fournies en langue Anglaise et Allemande.

L'étendue géographique des données couvre principalement (par défaut) l'Union Européenne, les Etats Unis, le Japon, la Chine,... et pour d'autres étendues géographiques, les données sont fournies sur demande.

La base de données GaBi est intégrée au logiciel GaBi (présenté plus loin dans cette section), toutefois elle peut interagir avec tous les principaux logiciels d'ACV et logiciels de CAO avec modules d'ACV comme SolidWorks, Sustainability et UMBERTO NXT LCA. Elle est en constant développement et mise à jour de façon communautaire par des experts en ACV d'une soixantaine de pays.

GaBi Database calcule lui-même (par son logiciel intégré) l'impact environnemental et présente des scénarios alternatifs pour les phases de fabrication, de distribution, de recyclage, pour réduire la pollution et améliorer les performances de développement durable des produits. Il travaille de manière équivalente à la base de données ECOINVENT [67].

Tous les jeux de données développés sont conformes aux recommandations de l'ILCD. Comme pour l'ELCD, tous les jeux de données sont agrégés dans la configuration standard.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

2.2.3. La Base INIES :

Développée depuis 2004, elle constitue un outil opérationnel et indispensable pour généraliser l'éco-conception des bâtiments.

Cette base de données est continuellement alimentée par les données environnementales et sanitaires de référence pour le secteur du bâtiment issues des déclarations environnementales et sanitaires communiquées sous forme de Fiche de Déclaration environnementale et Sanitaire (FDES) ou de Profil Environnemental Produit (PEP) qui représentent la carte d'identité environnementale d'un produit ou d'un équipement de la construction, basées sur les résultats de son Analyse du Cycle de Vie (ACV), dans la perspective du calcul de la performance environnementale du bâtiment et ce conformément aux dispositions de la réglementation environnementale et des normes en vigueur [69].

INIES est la base nationale française de référence sur les déclarations environnementales et sanitaires des produits, équipements et services pour l'évaluation de la performance des ouvrages. Elle constitue un outil opérationnel et indispensable pour alimenter les logiciels d'ACV notamment pour les dans le domaine du bâtiment en produisant des FDES, des PEP et autres données environnementales. INIES constitue un cadre formel pour la mise à disposition des Déclarations Environnementales et Sanitaires relatives aux produits de construction, réalisées par les professionnels (fabricants, associations de fabricants ou syndicats de fabricants) conformes à la norme NF P 01-010.

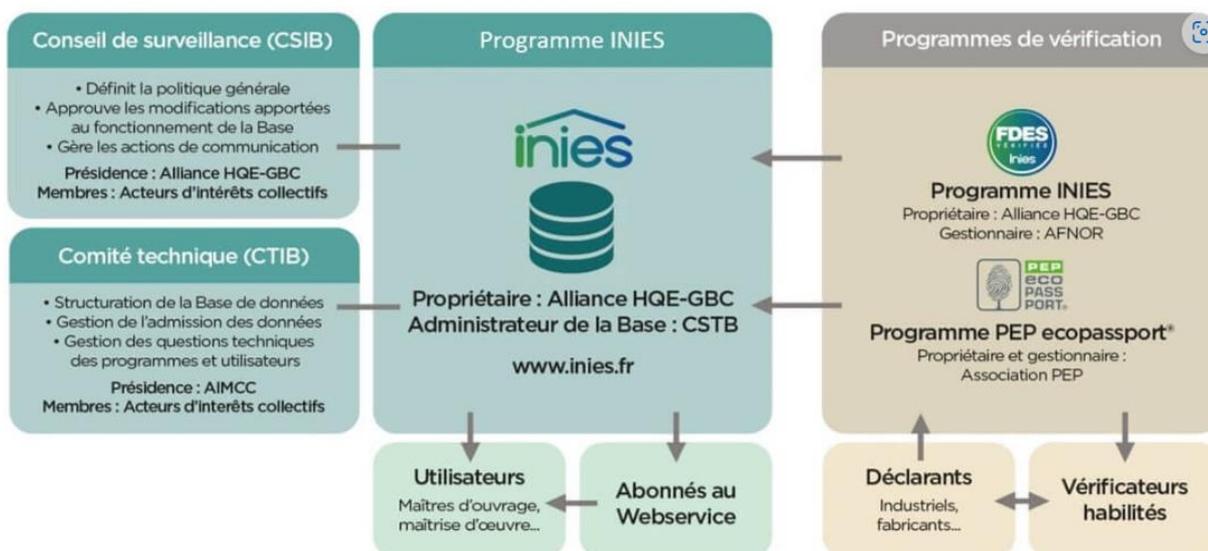
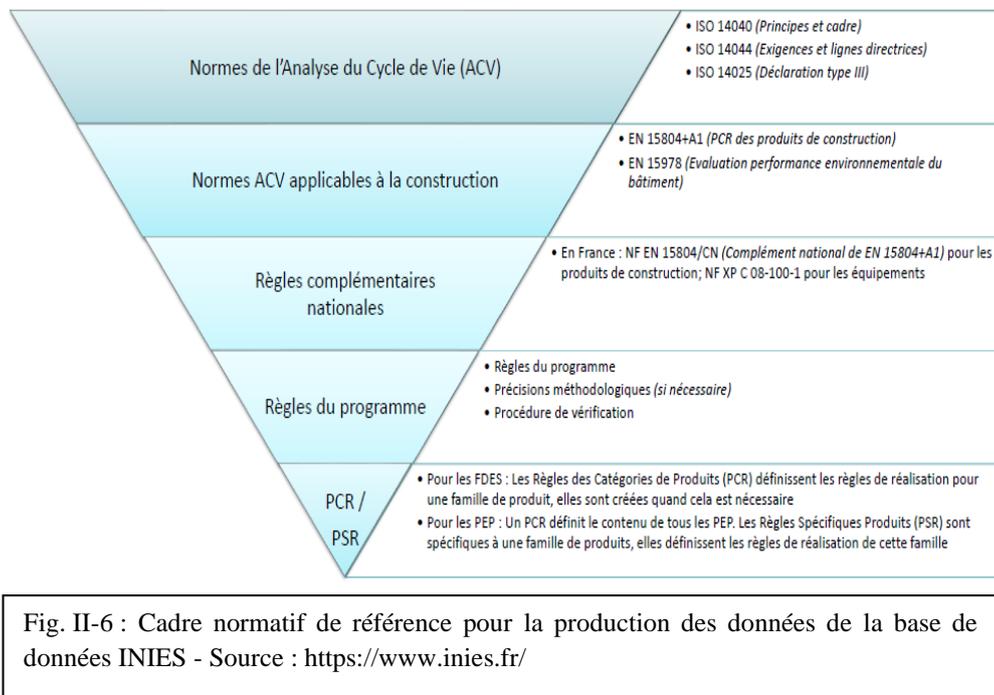


Fig. II-5 : Alimentation et supervision technique et administrative de la Base de données INIES (France)

Source : <https://www.inies.fr/>

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Le fonctionnement de la base INIES est régi par un protocole signé par les Ministères en charge de l'environnement, du logement, de la santé et de la culture ainsi que par d'autres organismes français tels : l'ADEME, l'AIMCC, l'ANAH, la CAPEB, le CNOA, le CSTB, la FFB, Qualitel et l'USH.



2.2.4. IMPACTS :

La Base IMPACTS est la base officielle de données génériques d'inventaire pour le programme gouvernemental français d'affichage environnemental des produits de grande consommation.

Il s'agit d'un outil simplifié permettant la quantification des impacts environnementaux d'un produit (ou d'un service) tout au long de son cycle de vie : de sa fabrication à son élimination en fin de vie. Le Bilan Produit (logiciel associé à la base de données IMPACTS) est basé sur la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

Le Bilan Produit permet à l'entreprise d'identifier quels sous-ensembles, matériaux, process ou étapes du cycle de vie sont responsables des principaux impacts engendrés par son produit, et ainsi d'identifier sur quel élément agir en priorité pour améliorer son produit sur le plan écologique.

2.2.5. ELCD :

European reference Life Cycle Database : Base de données développée par le JRC (Joint Research Centre, qui est le laboratoire de recherche scientifique et technique de l'Union européenne) avec le

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

soutien de Power Electronics International et de certaines associations industrielles comme Plastics Europe et Word Steel. Cette base fournit des jeux de données très consistants et de qualité. L'ELCD contient majoritairement des procédés agrégés.

2.2.6. EIME :

Créé en 1996, EIME est un outil logiciel et base de données développés par le Bureau Veritas (laboratoire d'essais et organisme de certification - France) et son département CODDE (Conception et Développement Durable). avec une base de données sectorielles intégrée. Elle s'intéresse particulièrement aux équipements électriques et électroniques et leur fin de vie.

Le logiciel EIME est un outil ACV et Eco-conception pour la quantification des impacts sur l'environnement et l'identification des pistes d'éco-conception .

Depuis 1996, EIME ne cesse d'évoluer pour mieux répondre aux exigences normatives et industrielles. En 2023, le LCIE Bureau Veritas a développé la 6ème version d'EIME.

Le logiciel EIME est présenté plus loin dans cette section.

2.2.7. Base Carbone :

La Base Carbone est une base de données publique de facteurs d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Elle est administrée par l'ADEME et est nécessaire pour réaliser un bilan d'émissions de GES et pour toute comptabilité carbone. La gouvernance de la Base Carbone est multi-acteurs, avec 14 membres tels que le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, le Mouvement des entreprises de France, le Réseau Action Climat, l'Association des Professionnels en Conseil Climat, etc. La consultation en ligne des données et de la documentation est gratuite, mais nécessite la création d'un compte. Elle est accessible en ligne sur le site Bilan GES de l'ADEME.

2.2.8. ESU life cycle inventory data :

ESU database est une banque de données produite par ESU-services (Suisse) spécialisé dans l'élaboration d'inventaires du cycle de vie (ICV) avec une documentation complète et transparente. La banque de données interne de ESU-services contient plus d'un millier d'ICV complémentaires dans différents formats (Ecospold, SimaPro, openLCA, Umberto, Gabi, etc.)

Les jeux de données développés par ESU-services sont vendus sur demande.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

2.2.9. US-LCI :

Développée par le NREL (National Renewable Energy Laboratory, situé à Golden, Colorado aux États-Unis) est le principal laboratoire national du département de l'Énergie des États-Unis) et ses partenaires, cette base de données publique propose des inventaires pour divers procédés selon un modèle américain.

NREL et ses partenaires ont créé la base de données U.S. Life Cycle Inventory (USLCI) pour aider les praticiens de l'évaluation du cycle de vie à répondre aux questions sur l'impact environnemental.

La base de données USLCI fournit une comptabilisation individuelle du berceau à la tombe des flux d'énergie et de matériaux entrant et sortant dans l'environnement qui sont associés à la production d'un matériau, d'un composant ou d'un processus [70].

2.2.10. DEAM / WISARD :

Base de données développée par PwC (Londres - Royaume-Uni) alimentant leur outil TEAM. Cette base contient des informations couvrant les utilisations courantes et comprend également des bases de données publiques pour d'autres matériaux. Les modèles utilisés pour la fin de vie sont issus de WISARD [71].

En guise de résumé, nous reprenons sur le tableau II-2, à titre indicatif, une liste non exhaustive (arrêtée en 2021 décembre 2020) des Bases de données ACV

Tab. II-2 : Liste non exhaustive des bases de données ACV		
Intitulé	Lien	Conformité EN
ACLCA Product Category Rules (USA)	http://www.aclca.org/	/
ASTM EPD (USA)	https://www.astm.org/CERTIFICATION/EpdAndPCRs.html	Not compliant with EN 15804
Australasian EPD	http://www.epd-australia.com/	EN 15804 verified
Base carbone ADEME (France)	http://www.basecarbone.fr/	/
Bau EPD (Austria)	http://www.bau-epd.at/en/building-materials-with-transparency/	EN 15804 verified

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Bauteil Katalog (Swiss)	http://www.bauteilkatalog.ch/ch/fr/catalogueconstruction.asp	/
BRE Environmental Profiles (UK)	https://www.bre.co.uk/Environmental_Profiles.html	Not compliant with EN 15804
BRE EPD (UK)	http://www.bre.co.uk/greenguide/page.jsp?id=558	EN 15804 verified
CarbonScopeData™	http://www.cleanmetrics.com/html/database.htm	/
CSA EPD (Canada)	http://www.csaregistries.ca/epd/about_epd_pcrs_e.cfm	Not compliant with EN 15804
DAP construcción (Spain)	http://www.csostenible.net/index.php/es/sistema_dapc	EN 15804 verified
DAP Habitat (Portugal)	http://daphabitat.pt/?page_id=461	EN 15804 verified
DIOGEN (France)	www.diogen.fr	/
Ecoinvent	http://www.ecoinvent.org/database/database.html	/
ELCD	http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/index.xhtml?stock=default	/
EPD Danmark (Denmark)	http://www.epddanmark.dk/site/index.html	EN 15804 verified
EPD Italy	http://www.epditaly.it/	EN 15804 verified
EPD Latin America	https://www.epd-americalatina.com/	EN 15804 verified
EPD Norge (Norway)	http://epd-norge.no/pcr/	EN 15804 verified
EPD Turkey	http://www.epdturkey.org/	EN 15804 verified
ESUCO (Europe)	http://www.dgnb-system.de/en/system/international/	/
European Aluminium EPD Programme	http://european-aluminium.eu/resource-hub/building-products-epd-programme/	EN 15804 verified
FDES (FR)	http://www.fdes-eco-construction.com/ensavoirplus/fdes/quest-ce-quune-fdes	Not compliant with EN 15804
Gabi Database	http://www.gabi-software.com/international/databases/gabi-databases/	/

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

GEDNet Global Environmental Declarations Network (Global)	http://gednet.org/	/
Global EPD (Spain)	https://www.en.aenor.es/aenor/certificacion/mambiente/globalepd.asp	EN 15804 verified
Green Book Live: Environmental Profiles (UK)	http://www.greenbooklive.com/search/scheme.jsp?id=9	/
IBO LCA database (Austria)	http://www.ibo.at/en/index.htm	/
IBU (Germany)	http://bau-umwelt.de/hp474/Umwelt-Produktdeklarationen-EPD.htm	EN 15804 verified
IERE Earthsure EPD (USA)	https://iere.org/programs/earthsure/	Not compliant with EN 15804
INIES FDES (France)	http://www.inies.fr/home/	EN 15804 verified
International EPD (Sweden)	http://environdec.com/Epd-Search/?search_type=simple&Category=7764	EN 15804 verified
ICE Carbon & Price book	http://www.icevirtuallibrary.com/isbn/9780727758125	/
ICE database	http://www.circularecology.com/embodied-energy-and-carbon-footprint-database.html#.WfBs-_5IKUk	/
ITB-EPD (Poland)	http://www.itb.pl/	EN 15804 verified
BEDEC (Spain)	https://itec.es/metabase/productos-sostenibles/m/m/m/	/
Leitfaden database (Luxembourg)	http://www.crtib.lu/de/leitfaden-fuer-nachhaltiges-bauen	/
Minnesota Building Materials Database (USA)	http://www.buildingmaterials.umn.edu/materials.html	/
MRPI (NL)	http://www.mrpi.nl/	EN 15804 verified
NSF EPD (USA)	http://info.nsf.org/Certified/Sustain/listings.asp?ProdCat=EPD	/
Ökobau.dat (Germany)	http://www.oekobaudat.de/	/
PEP Ecopasseport (France)	http://www.pep-ecopassport.org/	Not compliant with EN 15804

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

PlasticsEurope (Europe)	http://www.plasticseurope.org/plastics-sustainability/life-cycle-thinking/epd-reports.aspx	/
RTS EPD (Finland)	http://epd.rts.fi/en	EN 15804 verified
SCS Global Services (USA)	https://www.scsglobalservices.com/	EN 15804 verified
SCS EPD Verified ISO 21930 (USA)	https://www.scsglobalservices.com/	Not compliant with EN 15804
SCS EPD Verified ISO 14025 (USA)	https://www.scsglobalservices.com/	Not compliant with EN 15804
The Athena Institute database (Canada)	http://www.athenasmi.org/our-software-data/overview/	/
UL Environment (USA)	http://industries.ul.com/environment	EN 15804 verified
Wood for Good LCA database (UK)	https://woodforgood.com/lifecycle-database/	EN 15804 verified
WorldSteel (Global)	http://www.worldsteel.org/?action=programs&id=62	/
ZAG EPD (Slovenia)	http://www.zag.si/en/	EN 15804 verified
<i>La norme européenne EN 15804 précise les informations pertinentes, les exigences sur l'origine des données et définit le cadre de leur présentation</i>		

3. LES LOGICIELS D'ACV

La manipulation de quantités importantes de données lors d'une étude ACV étaient fastidieuses et prenaient beaucoup de temps et d'argent. La nécessité d'analyser les performances environnementale d'un produit selon plusieurs paramètres, d'effectuer les calculs d'agrégation afférents, de représenter graphiquement les divers modèles correspondant aux phases du cycle de vie et d'évaluer directement les conséquences d'un choix de conception a conduit à l'élaboration d'outils informatisés d'analyse d'impact environnemental [70] particulièrement les Logiciels dédiés à l'ACV et à l'Eco-conception.

La plupart des logiciels d'analyse du cycle de vie reposent sur l'exploitation et le traitement des données fournies soit par l'acteur ACV ou puisées directement des bases de données spécifiques à l'ACV, à l'éco-conception et à l'économie circulaire. Il faudra veiller à ce que le logiciel utilisé par l'analyste ACV ait accès aux bases de données pertinentes.

Il existe des bases de données couplées à leurs propres logiciels de calculs et de modélisation tel le logiciel GABI, EIME... Toutefois il y a des logiciels dédiés à ce type d'analyse et d'évaluation (ACV) qui s'appuient sur les données fournies par des Bases de données autonomes tels SIMAPRO, UMBERTO.

D'autres logiciels comme ECO AUDIT ont inclus un module ACV. Certains logiciels de conception Assistée par Ordinateur - CAO ont intégré des modules d'évaluation ACV comme *SolidWorks Sustainability* et Inventor avec son outil appelé *Eco Materials Adviser* etc.

A partir de la connaissance du volume de la pièce dessinée et le soutien d'une base de données comme ECOINVENT, ces logiciels évaluent un indicateur global lorsque le concepteur définit les/matériau(x) utilisé(s) et le procédé de fabrication. Cette catégorie de logiciels est utilisable par des concepteurs non spécialistes des impacts environnementaux. Ils utilisent donc la double interface du Logiciel, la première servant à modéliser les produits comme Logiciels de Conception Assisté par Ordinateur - CAO et la seconde à gérer les données d'inventaires sur le cycle de vie du produit et/ou la pièce conçue. Dans cette catégorie de logiciels nous pouvons citer SOLIDWORKS (avec son module d'ACV appelé *SolidWorks Sustainability*).

Lors d'une ACV, l'agrégation de l'ensemble des données d'impacts environnementaux peut représenter une partie non négligeable de l'étude mais ne présente que peu d'intérêts en termes

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

méthodologiques. Il existe ainsi plusieurs types de logiciels dont le but est d'aider à la réalisation de cette étape de l'analyse sur cycle de vie.

Une partie de ces logiciels proposent des évaluations qualitatives, comme des indices écologiques, d'autres proposent des évaluations sous forme de check-lists spécialisées dans des domaines précis et enfin ceux proposant des évaluations quantitatives, nécessitant une grande quantité de données mises à jour régulièrement [72].

Dans cette dernière catégorie, certains logiciels sont dédiés uniquement à des experts en gestion environnementale tels *Simapro de la compagnie Pre-Consultant* aux Pays-Bas, *GABI-PE* en Allemagne [7] ou *TEAM, Ecobilan* en France [8].

3.1. SIMAPRO

SIMAPRO (PRé, 2016) est un outil informatique professionnel pour le calcul des impacts environnementaux, sociaux et économiques associés à un produit ou service tout au long du cycle de vie, avec l'application de l'éco-conception, le développement des écolabels, le calcul de l'empreinte carbone ou empreinte sur l'eau et d'autres fonctionnalités intéressant les chercheurs et les spécialistes en environnement.

Logiciel de référence à l'échelle mondiale. SIMAPRO a été développé par l'entreprise *Pré-Consultants (Pays Bas)*, il interagit avec la base de données *ECOINVENT* [73], et d'autres bases de données scientifiques internationalement reconnues comme, par exemple, la base de données européenne de Cycle de Vie (ELCD). Il inclut aussi des méthodologies d'évaluation de l'impact, le calcul et la modélisation d'une panoplie d'éco-indicateurs dont CML 2001 base, *Éco-indicateur 99*, *ReCiPe*, *Impact 2002 +*, *IPCC 2007*, *GWP100a*, etc.) [74].

SIMAPRO représente la plus grande part des outils d'ACV vendus sur le marché et il est le plus couramment utilisé par les chercheurs [67] [74].

Le programme calcule l'impact environnemental du produit, à différentes étapes du cycle de vie et le représente par des graphiques et des « éco-points » (indicateurs économiques). D'autres fonctionnalités qui caractérisent la robustesse de SIMAPRO, telle que :

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- *Generate a process network (fig. II-7)* est une représentation graphique du modèle étudié par le logiciel SIMAPRO. Il est utile pour avoir un aperçu rapide de ce que le concepteur envisage de déterminer comme processus inclus dans le périmètre étudié (Frontière du système) ainsi les flux de matières pourrait également être mis en exergue [75].
- Pendant la phase de conception architecturale, le logiciel d'ACV SIMAPRO est utile pour avoir un aperçu rapide sur l'évaluation des impacts environnementaux sous réserve que le concepteur dispose déjà des informations sur les matériaux, les processus, la masse et la consommation d'énergie.
- Le concepteur peut mesurer l'impact du produit et le comparer avec des produits anciens ou compétitifs par l'utilisation de SIMAPRO. Dans cette étape le concepteur aura à définir avec exactitude le type de matériau avec sa quantité, les procédés de fabrication impliqués et les autres caractéristiques du cycle de vie du produit.

Les liens, ci-après, permettent d'obtenir de plus amples informations autour de SIMAPRO :

- <https://simapro.com/>
- <https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/>

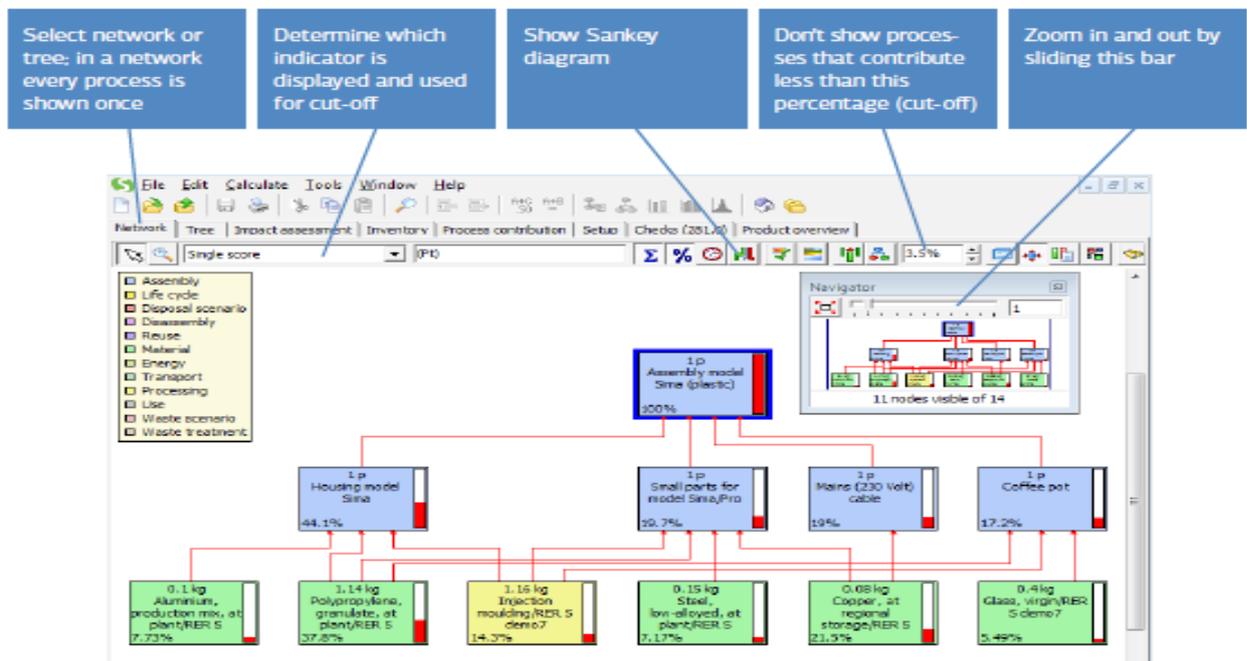


Fig. II-7: Génération d'un réseau de processus avec SIMAPRO

3.2. UMBERTO NXT LCA

UMBERTO (Umberto, 2016) est un logiciel de iPoint-systems gmbh - Reutlingen – Germany qui permet de modéliser, calculer, visualiser et évaluer les flux de matières et les flux d'énergie (Fig. II-8) et permet aussi de comprendre les procédés complexes de manière simple par des illustrations

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

graphiques qu'il fournisse [76]. L'interface graphique d'Umberto permet de réaliser des diagrammes de flux.

Il dispose également d'un système d'évaluation des impacts. Les industriels de la chimie, des semi-conducteurs, du management des déchets et les industries de l'imprimerie sont nombreuses à utiliser Umberto.

Le module UMBERTO NXT LCA est un module permettant l'évaluation du cycle de vie et qui génère une analyse de l'inventaire du cycle de vie. Le résultat donne un aperçu simplifié des impacts environnementaux du produit.

Il intègre la base de données ECOINVENT et les dernières méthodes de calcul d'impacts environnementaux comme ReCiPe, Impact 2002+, Eco-Indicator 99, CML, TRACI, IPC [77].

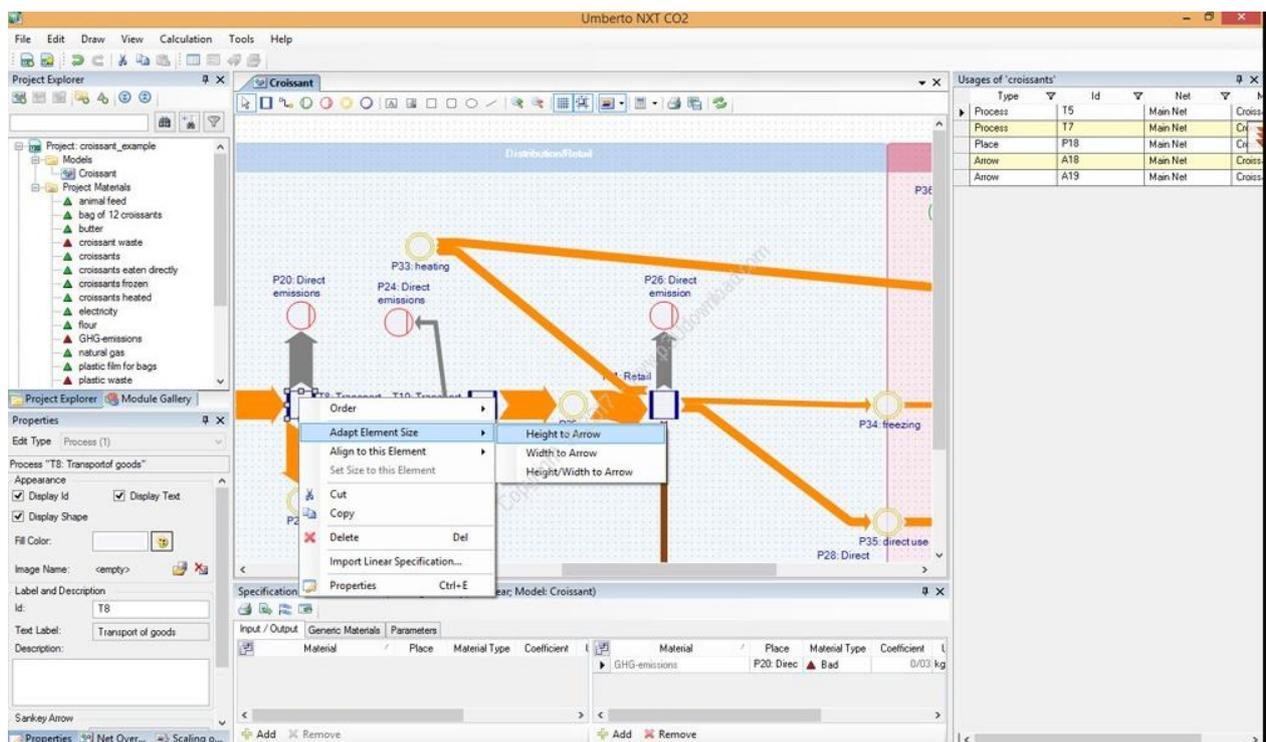


Fig. II-8 : Extrait de l'environnement du logiciel UMBERTO

UMBERTO for Carbon Footprint est un autre module du logiciel, qui permet de calculer l'empreinte carbone d'une entreprise, d'un procédé ou d'un produit, de l'analyser en détail et fournir, si nécessaire, des mesures correctives efficaces pour parvenir à une réduction significative de l'empreinte carbone.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

3.3. GABI

GaBi 4 (GaBi Analyst Version), est un outil puissant d'Analyse de Cycle de Vie qui permet le développement de produits éco-conçus. Sa capacité à traiter une grande quantité de données permet une modélisation plus fine de cycles de vie de produits.

GaBi est pourvu de diverses fonctionnalités utiles, particulièrement dans les aspects suivants [78]:

- **Design pour l'Environnement** : développement de produits conformes aux réglementations environnementales ;
- **Efficacité environnementale** : optimisation des consommations de matières premières et d'énergie des entités, processus et produits ;
- **Eco-conception** : développement de produits à empreinte environnementale réduite (GES, eau, déchets générés) ;
- **Chaîne de valeur** : améliorer l'efficacité tout au long de la chaîne de valeur : conception, production, fournisseurs, distribution... ;
- **Réduction de Coûts** : conception et optimisation des produits et des procédés pour réduire les coûts ;
- **Marketing de Produits Eco-conçus** : étiquetage environnemental, Déclarations Environnementales de Produits (DEPs) ;
- **Elaboration de Rapports Développement Durable** : communication environnementale sur les performances du produit ;
- **Partage de connaissances en ACV** : reporting et analyses destinés pour des services internes, la hiérarchie et les fournisseurs ;
- **Production responsable** : développement de procédés de fabrication qui tiennent compte de la dimension sociale.

Le logiciel est particulièrement intéressant pour des applications industrielles notamment dans le domaine de l'automobile et de l'électronique ou pour modéliser des processus non linéaires.

Le logiciel intègre également une base de données « GABI DATABASE » facilement accessible et constamment mise à jour qui détaille l'impact environnemental, l'énergie et les coûts engendrés par chaque élément composant un produit manufacturé. L'analyse de l'impact environnemental peut être faite pour chaque étape du cycle de vie et pour des scénarios divers afin d'aboutir un scénario d'éco-conception optimal.

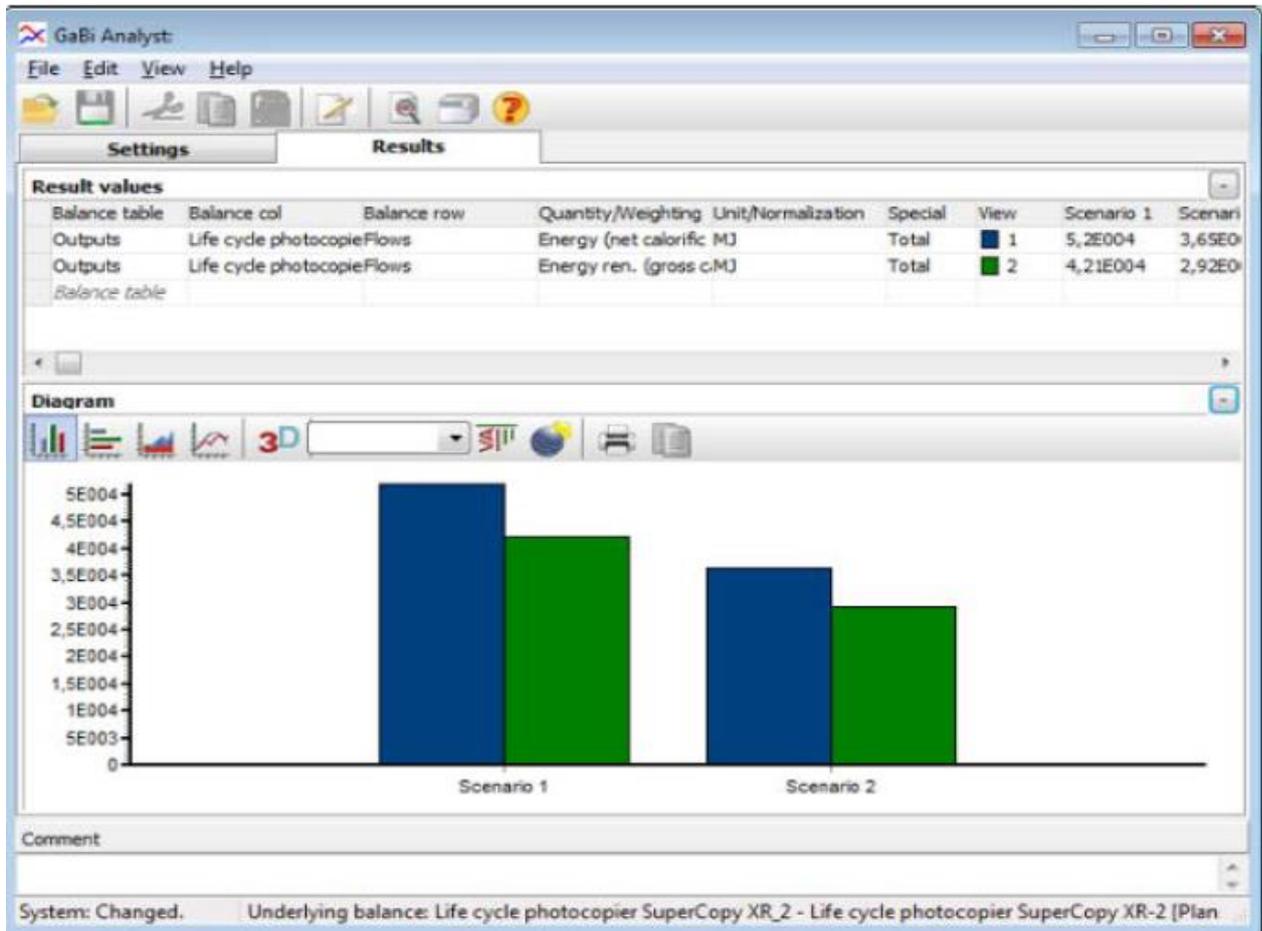


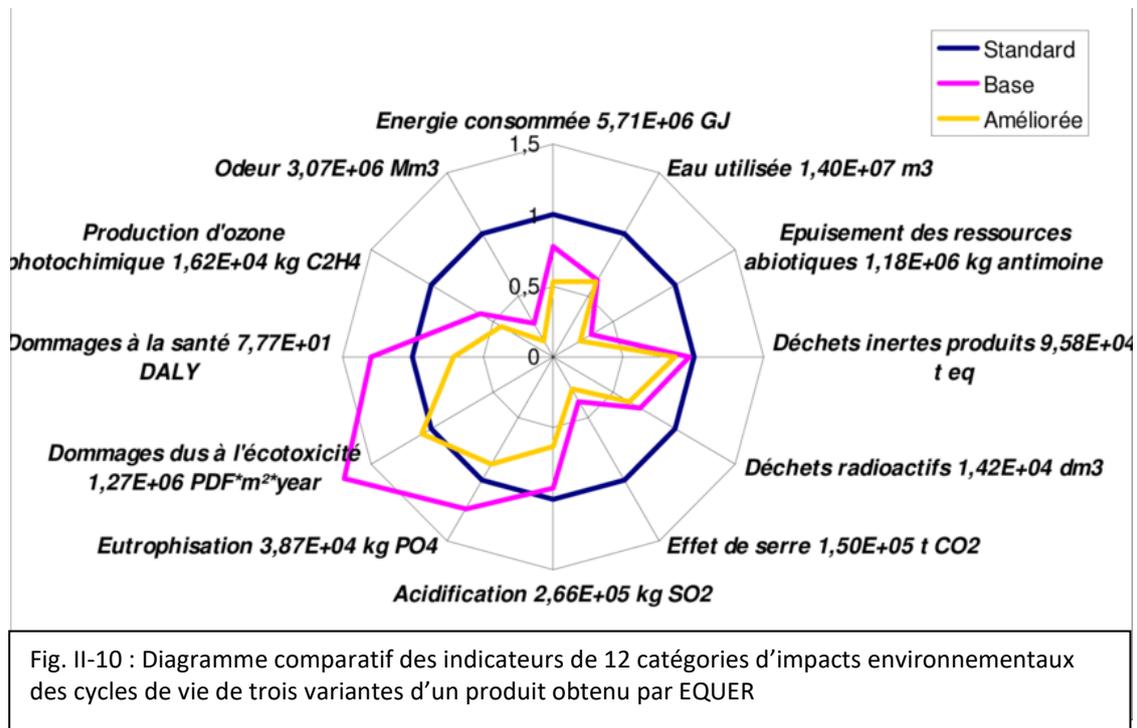
Fig. II-9: Utilisation de GABI pour la comparaison de la performance entre deux (02) scénario

3.4. EQUER

EQUER est un logiciel associant l'Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment à la simulation thermique dynamique. Il permet de calculer jusqu'à 12 impacts environnementaux intermédiaires en s'appuyant sur une base de données d'ACV avec des inventaires pour les matériaux et pour les procédés.

La particularité de ce logiciel est le fait qu'on peut intégrer les caractéristiques des bâtiments étudiés tels que les matériaux constituant le bâtiment (et leurs quantités), le mode de gestion de déchets, le comportement des occupants.

Le logiciel est utilisé notamment pour la comparaison de différentes variantes à l'effet de situer les niveaux de performances d'un projet par rapport à la réglementation et aux meilleures pratiques [79].



3.5. Bilan Produit

L'outil « Bilan Produit » utilise des résultats d'ACV pour fournir des impacts environnementaux groupés en deux catégories :

- Les indicateurs "Ressources", qui caractérisent les consommations réelles de ressources qu'engendre le produit sur l'ensemble de son cycle de vie.
- Les indicateurs "Impacts" qui caractérisent les pollutions réelles et/ou potentielles générées par le produit sur l'ensemble de son cycle de vie.

« Bilan Produit » est connue par son utilisation simple.

Malgré l'évolution de la plupart des outils informatiques ACV en privilégiant les indicateurs impacts, la méthodologie «Bilan Produit» conserve des indicateurs de consommation de ressources qui gardent toujours leurs importance.

Les indicateurs "ressources" évalués par l'outil Bilan Produit sont :

1. La consommation d'énergie non renouvelable [en MJ], indicateur qui exprime la quantité totale d'énergie fossile consommée sur tout le cycle de vie du produit.
2. La consommation de ressources rares [Kg éq. Antimoine – kg de Sb éq.], indicateur qui exprime la quantité de matières "rares" consommée sur tout le cycle de vie du produit.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

L'utilisateur de l'outil « Bilan Produit » a également la main pour modifier les coefficients de normalisation.

3.6. ELODIE

Le logiciel ELODIE, réalisé par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - France), est spécifique au domaine du bâtiment et il est relié à la base de données INIES. En s'appuyant sur des FDES (Fiche de Déclarations Environnementales et Sanitaires) établies, elles mêmes, conçues selon la norme NF EN 15804+A1, on peut passer grâce à cet outil de l'échelle des produits (matériaux et éléments de construction) à celle de l'ouvrage. L'outil permet également d'intégrer dans la modélisation les consommations d'énergie et d'eau de l'ouvrage en exploitation.



Fig.II-11 : Extrait de l'environnement et des fonctionnalités du logiciel ELODIE

3.7. Open LCA

Logiciel d'ACV open-source est accessible et téléchargeable gratuitement, il a été développé depuis 2007 en Allemagne par GreenDelta, un cabinet de consultants allemand spécialisé dans l'ACV avec le support du PE1 International, PRé Consultants et UNEP (United Nations Environment Programme). L'accès aux bases de données est souvent payant.

Le logiciel donne accès à une dizaine de bases de données fournissant des données génériques ou au contraire très spécialisées.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Open LCA donne la possibilité d'importer n'importe quelle base de données au format EcoSpold ou ILCD directement dans OpenLCA. Des convertisseurs existent afin de créer des données dans le format souhaité. Il est alors possible de travailler avec les bases de données Agribalyse, Ecoinvent, ou Agrifootprint par exemple. Certaines bases de données telles que Agribalyse sont gratuite mais d'autres peuvent être payantes.

L'OpenLCA Nexus, un projet intimement lié à openLCA, Nexus se propose de développer un format de stockage et d'échange standard pour les bases de données d'ICV. Du coup, chacune des bases les plus répandues sera accessible et peut être importée dans openLCA, Le logiciel est compatible avec Mac et Windows avec possibilité d'accès aux Tutoriels proposés par Open LCA sur Youtube et diverses formations organisées par d'autres organismes tel que CIRAIG Canada.

Tab. II-3 : comparaison simplifiée entre les logiciels OPENLCA, GaBi et SimaPro [149]

	openLCA	GaBi	SimaPro
Prix	😊	😞	😞
Facilité d'utilisation	😊	😊	😊
Capacités de calcul avec des données agrégées	😊	😊	😊
Capacités de calcul avec des données désagrégées	😊	😞	😊
Analyse d'incertitude – arrière-plan	😊	😞	😊
Analyse d'incertitude – avant-plan	😊	😊	😊
Régionalisation	😊	😞	😞
Capacité d'analyses/interpretation	😊😊	😊😊	😊
Import-export données de différentes BD	😊	😞	😞
Partage modèles	😊	😊	😊
Bonne utilisation des fonctionnalités d'ecoinvent v3	😊	😞	😊

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

3.8. EIME :

EIME (Environmental Improvement Made Easy/Evaluation des IMPacts Environnementaux) est un logiciel d'ACV développé par CODDE (Conception, Développement Durable et Environnement) qui est une Société par Actions Simplifiée (SAS) experte en éco-conception et en management environnemental produit.

CODDE est un pôle d'expertise en éco-conception qui a été créé en 2003 pour répondre aux exigences réglementaires et aux attentes du marché, il bénéficie de l'expérience et de l'expertise des entreprises et syndicats professionnels adhérents tout en gardant et développant son indépendance d'action auprès de ses clients. Il développe et enrichit ses travaux en Eco-conception et notamment sur les performances environnementales des produits via la méthodologie EIME utilisée par les entreprises de l'équipement électronique depuis 1998.

L'EIME un outil-logiciel simple et pragmatique pour mener des Analyses du cycle de vie et modéliser des produits. Il permet de calculer les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service à partir de données d'inventaires. Il aide à construire le modèle du cycle de vie du produit ou du service et à y associer les processus élémentaires correspondants.

Créé en France en 1998 à l'initiative d'industriels du secteur Électrique et Électronique au sein de la FIEEC, il est aujourd'hui développé et maintenu par le département CODDE de LCIE Bureau Veritas.

En 1996, un groupe d'industriels du secteur Electrique et Electronique regroupant Alcatel, Alstom, IBM, Legrand, Schneider Electric ou encore Thomson est constitué au sein de la FIEEC. Avec le support de l'ADEME, ce groupe se penche sur la réflexion d'outils d'éco-conception.

En 1998, ce projet donne naissance au logiciel EIME et à la base de données associée (présentée, ci-dessus). D'abord réservé à un usage en interne, EIME est commercialisé à partir de 2003 par la société CODDE. Il propose des interfaces et des bases de données adaptées aux problématiques de divers secteurs comme ceux du textile ou encore des transports en sus de celui du secteur Electrique et Electronique .

La nouvelle version web du logiciel, disponible depuis 2012, prend en compte les recommandations du JRC (Joint Research Center de la commission européenne) et de l'ILCD3.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Le logiciel EIME v5 (Octobre 2018), est une application web. L'hébergement de l'application est assuré en cloud computing. L'accès à l'interface se fait via un navigateur internet [80].

Le logiciel EIME permet de réaliser des études d'ACV conformément à la série des normes ISO 14040 et aux recommandations de la plateforme ILCD3.

EIME dispose d'une interface générique sans spécificité particulière.

Le logiciel possède également des interfaces dédiées :

- aux produits électriques et électroniques ;
- aux produits textiles ;
- aux transports.

Le logiciel EIME est développé en prenant en considération les spécificités associées à chaque secteur d'activité, d'un point de vue technique et industriel : adaptation des cycles de vie typique, modes de production et données spécifiques, complexité de la chaîne d'approvisionnement... mais aussi d'un point de vue normatif : ISO 14040, EN 15804, PEF, BP X 30-323... Ainsi, les paramètres suivants ont été adaptés :

- visualisation du cycle de vie ;
- modélisation sous forme de nomenclature produit (sous-ensembles, pièces élémentaires...);
- intégration de modèle pré-paramétré (template).

La fonction « import/export » de données et de résultats a été intégrée au logiciel.

En complément des calculs d'impacts environnementaux, EIME permet de calculer des indicateurs tels que :

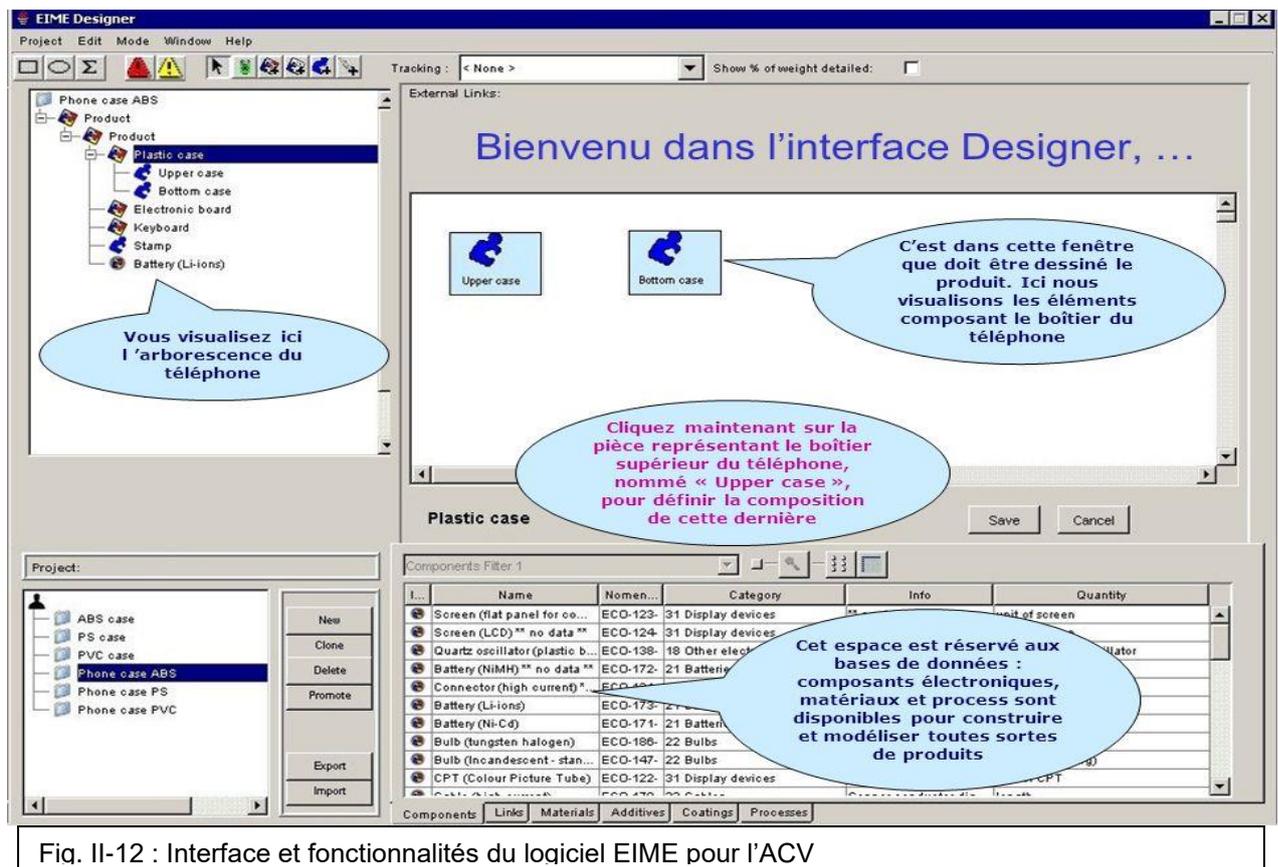
- la recyclabilité selon la méthode Eco-DEEE4 développée en partenariat avec l'ADEME et le laboratoire G-Scop5 ;
- les indicateurs énergétiques ;
- le bilan matière du produit...

EIME dispose de bases de données sectorielles propriétaires développées sur la base de collecte de données industriels, de travaux bibliographiques ou de travaux spécifiques à des groupements d'industriels. Elle est, également, remise à jour tous les deux ans [72].

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Le logiciel EIME dispose des indicateurs suivants :

- indicateurs du programme PEP ecopassport;
- indicateurs ILCD;
- indicateurs CML (notamment ceux recommandés par l'EN 15804).



3.9. Ecodesign Studio

Ecodesign Studio est un logiciel d'analyse du cycle de vie développé par Altermaker. Il permet de mettre en place une démarche d'éco-conception et d'évaluation des impacts environnementaux des produits d'une entreprise.

Il s'agit d'un outil collaboratif de gestion de projet, relié à des bases de données qui sont spécifiques à l'économie circulaire et à l'éco-conception. De nombreux experts interviennent lors d'un projet d'éco-conception.

Le logiciel est accessible :

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- Soit avec une session sécurisée grâce à un navigateur web via le serveur d'Altermaker ;
- Soit via une installation complète sur le serveur du client.

Le logiciel Ecodesign Studio regroupe plus d'une dizaine de modules nécessaires à l'éco-conception dont les principaux permettent notamment de :

- Réaliser l'évaluation environnementale d'un produit ;
- Gérer ses nomenclatures ;
- Générer des analyses de cycle de vie ;
- Lancer des simulations de re-conception ;
- Construire un plan d'action.

Ecodesign Studio est un outil d'aide à l'implémentation du système de management de l'environnement et la certification ISO 14001 en offrant une démarche claire étape par étape.

Ecodesign Studio est un outil permettant aux bureaux d'études la comparaison de l'impact environnemental entre deux (02) ou plusieurs matériaux ou des modes de fabrication variés.

3.10. ECO-it

C'est un outil simple et rapide pour l'évaluation du cycle de vie développé par PRé Consultants B.V. (Pays Bas). L'évaluation est effectuée sur la base de la méthode des éco-indicateurs 95 et 99 fournissant des conseils et non des valeurs absolues, c'est-à-dire des recommandations pour l'amélioration des processus.

ECO-it permet de modéliser un produit complexe et l'essentiel de son cycle de vie. ECO-it calcule la charge environnementale et montre quelles parties du cycle de vie du produit y contribuent le plus, il permet de voir quelles pièces nécessitent une optimisation. Ce qui permet d'améliorer les performances environnementales des produits.

ECO-it est livré avec plus de 500 scores d'impact environnemental et d'empreinte carbone (CO2) établis par la méthode ReCiPe particulièrement ceux des matériaux couramment utilisés tels que les métaux, les plastiques, le papier, le carton et le verre ainsi que les processus de production, de transport, d'énergie et de traitement des déchets.

Plus grand est le score, plus l'impact est important. Pour cette analyse, le logiciel utilise deux catégories d'indicateurs écologiques :

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- Les indicateurs issus de la méthode ReCiPe ;
- Les indicateurs liés à l'empreinte carbone des produits (en kg équivalent CO₂).

Le programme présente une fenêtre principale avec un menu en quatre options intitulées:

- Cycle de vie : dans lequel la gestion du cycle de vie du produit est décrite.
- Production : les matériaux, les procédés, l'énergie et le transport sont spécifiés.
- Utilisation : tous les types d'énergie et de transport impliqués dans le produit sont déterminés.
- Elimination : les options de fin de vie du produit ou de ses différentes parties sont spécifiées.

3.11. Bilan Produit

Le logiciel *Bilan Produit* permet de modéliser de manière simple le produit, en prenant en compte, dans les principales étapes de son cycle de vie, les matériaux qui le composent, les procédés de fabrication, les moyens de transport, les sources d'énergie, la fin de vie.

L'estimation des impacts porte sur huit (08) indicateurs (fig. II-13) et permet de comparer différentes simulations pour un même produit et d'identifier ainsi des pistes d'amélioration de sa qualité écologique.

Le logiciel est destiné aux entreprises et aux particuliers et a été conçu pour l'ADEME par l'université de Cergy-Pontoise. Il permet d'évaluer rapidement et facilement l'impact environnemental d'un produit sans avoir besoin de consulter des spécialistes du domaine. Présenté comme une feuille de calcul, le logiciel repose sur la base de données ECOINVENT.

La méthode de caractérisation des impacts choisie est la méthode CML3 largement reconnue et garantissant des résultats fiables. Le *Bilan Produit* est basé sur la méthodologie de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) en adoptant trois d'approches d'évaluation et de quantification des impacts environnementaux :

- Une approche fonctionnelle : le logiciel évalue les impacts environnementaux induits par la fonction rendue par le produit ;
- Une approche cycle de vie : toutes les étapes de la vie du produit sont prises en compte, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à son élimination en fin de vie ;

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

- Une approche multicritères : les consommations de matière et d'énergie, les rejets et émissions dans l'air, la pollution de l'eau et des sols, sont quantifiés à chaque étape du cycle de vie et exprimés selon divers indicateurs.

Le logiciel peut être utilisé pour évaluer l'impact d'un produit ou pour comparer les impacts de deux produits rendant la même fonction.

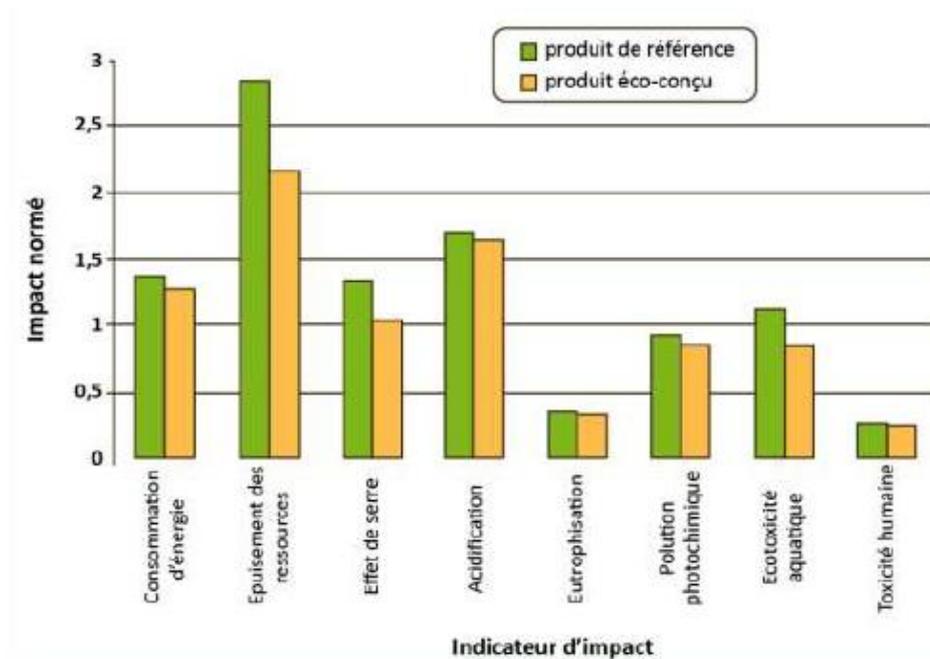


Fig. II-13 : exemple d'évaluation avec *Bilan Produit selon 08 indicateurs* (ADEME, 2016)

4. OUTILS SIMPLIFIES D'ACV

En raison de la difficulté de recueillir une grande quantité de données pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit avec des outils logiciels d'ACV, des outils d'ACV simplifiée (S-LCA) ont été développés. Dans ces outils, les simplifications se produisent à différents niveaux, tels que : les données d'entrée, les méthodes de calcul et de l'interface graphique [81].

Dans cette catégorie d'outils, plusieurs autres outils ont été développés, tels que *Quantis Suite 2.0* [82], *Sustainable Minds*, et *LCA to Go...* Ces outils qui s'adressent aux utilisateurs non-experts offrent une approche plus immédiate et simplifiée par l'interaction avec les utilisateurs et permettant une première estimation de l'empreinte carbone et d'autres indicateurs d'impacts.

4.1. TEAM

TEAM (Tools for Environmental Analysis and Management) Team est un outil développé par Price water house Coopers. Il permet de décrire des systèmes industriels et d'en calculer les inventaires du cycle de vie associés ainsi que les impacts environnementaux potentiels.

4.2. WISARD

Waste Integrated Systems Assessment for Recovery and Disposal est un logiciel développé par la société EcoBilan en 1999, en collaboration avec Eco-Emballages, l'ADEME et l'Agence Anglaise de Protection de l'Environnement. Les dernières versions permettent de mesurer les impacts environnementaux d'un scénario dans son entier (collecte, transport, traitement, valorisation, etc.). Cet outil a été utilisé par les autorités locales en Angleterre, l'agence environnementale écossaise, en France et en Nouvelle Zélande. WISARD est construit selon le modèle du logiciel TEAM.

4.3. EASETECH

Outil d'ACV spécialisé dans la gestion des déchets, développé par l'Université Technique du Danemark (DTU) depuis une dizaine d'années et alimentée principalement par les activités de recherche de leurs équipes. EASETECH modélise l'utilisation de ressources, la récupération de matières premières secondaires et les émissions associées à la fin de vie. Cet outil est gratuit pour les chercheurs, consultants et autres après une formation à l'utilisation et à l'interprétation du modèle.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Le logiciel EASETECH (anciennement EASEWASTE) est dédié totalement à l'analyse des modes de traitement des déchets. De l'avis des développeurs, il s'agit d'un logiciel convivial, bien documenté et proposant un système de modélisation très flexible.

Le niveau de paramétrage est très élevé et permet à l'utilisateur d'ajuster la modélisation selon ses spécificités (de la définition de la composition du déchet par fraction ou par composition chimique, à la modélisation des procédés de traitement de déchets). Il prend en charge toutes les étapes du cycle de vie des déchets; La liste des procédés contient l'ensemble des technologies actuellement utilisées dans le secteur du traitement des déchets ménagers.

4.4. WRATE

Waste and Resources Assessment Tool for the Environment est un outil développé par les agences de protection de l'environnement anglaise et écossaise et le département environnement de l'Irlande du Nord pour étudier les impacts d'un scénario de gestion des déchets sur l'environnement.

L'objectif était de proposer un outil pour des utilisateurs non experts en ACV pour modéliser leur scénario de gestion de déchets avec des données propres ou avec des données issues de la base de données. Le logiciel supporte un haut degré de flexibilité et nécessite une période de formation. Une version d'essai permet d'accéder aux inventaires de cycle de vie sans que les résultats ne soient accessibles

4.5. ORWARE

Organic Waste Research est en développement depuis 1993 a été créé par plusieurs instituts de recherche et universités suédoises, dont KTH. Initialement, l'outil se focalisait sur l'analyse de scénarios de gestion des déchets organiques. Il est devenu de plus en plus complexe en s'enrichissant de nouvelles données (procédés de traitement des déchets, et fractions de déchets).

Toute modification (même celle d'un procédé) s'effectue via Matlab, le logiciel sur lequel repose ORWARE. Aucune version commerciale ne peut être obtenue, ORWARE étant un outil utilisé principalement pour des sujets de recherches suédois.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

4.6. MSW-DST or ISWM-DST

Municipal Solid Waste Decision Support Tool a été développé par l'US-EPA, l'Université de l'état de la Caroline du Nord, l'institut de recherche Triangle et l'université du Wisconsin. Il a été développé pour étudier et évaluer les impacts de scénarios de gestion des déchets, et pour proposer des alternatives sur un plan environnemental (monocritère carbone) et économique. MSW-DST est conçu spécifiquement dans un contexte Nord Américain. Le modèle est très complexe et fournit à l'utilisateur un large choix de données relatives à la collecte des déchets et aux centres de transfert.

4.7. CMLCA (Chain Management by Life Cycle Assessment)

CMLCA fait partie des logiciels libres, il ne dispose pas de base de données ni de méthodes d'évaluation d'impact mais elles peuvent être importées et mises en interaction avec le logiciel.

4.8. KCL-eco

KCL-eco est un logiciel d'analyse de cycle de vie finlandais. De plus amples informations autour de KCL-eco et Une version d'évaluation complète sont disponible sur le site : http://www.kcl.fi/page.php?page_id=166

4.9. LCA-it

LCA-it est un logiciel d'analyse de cycle de vie suédois. Une version d'évaluation peut-être téléchargée gratuitement via le site internet. <http://www.lcait.com/>

4.10. REGIS

REGIS est un logiciel d'analyse de cycle de vie suisse. Une version d'évaluation peut-être commandée gratuitement sur demande via le site internet. http://www.sinum.com/htdocs/e_software_regis.shtml

4.11. QUANTIS SUITE 2.0

"Quantis SUITE 2.0" est un logiciel d'ACV proposant des formulaires grâce auxquels il est possible de collecter les données internes à l'entreprise ainsi que celles concernant ses fournisseurs. Conçu pour permettre d'évaluer les empreintes environnementales des sites industriels et des produits en mettant en œuvre une méthodologie multicritères, le logiciel comporte aussi une base de données grâce à laquelle on peut calculer l'empreinte eau et intégrer simultanément les coûts.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

5. LOGICIELS « CAO » AVEC MODULES POUR LA MESURE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les outils d'analyse d'impact environnemental peuvent être intégrés aux Logiciels de Conception Assistée par Ordinateur – CAO [81] tels que:

5.1. SOLIDWORKS

SOLIDWORKS est un logiciel de CAO développé, depuis 1995, par la société française DASSAULT Systèmes, ses dernières version, notamment celle de 2022, sont dotées d'un module intitulé *SolidWorks Sustainability* (fig. II-14) fournissant un tableau de bord complet d'informations d'ACV où le concepteur peut déterminer l'impact environnemental des assemblages prévus pour un produit. Le module *SolidWorks Sustainability gXpress*, qui est livré avec *SolidWorks 2010*, permet de voir des informations détaillées sur les pièces individuelles. Le logiciel intègre un outil d'analyse des estimations de l'impact environnemental du produit en récupérant les données directement à partir de l'ensemble conçu.

SolidWorks Sustainability fournit des caractéristiques de conception durable simple et rapide pour les ingénieurs de tous les niveaux de compétence et conduit, rapidement et facilement, l'analyse complète d'ACV des pièces et des assemblages.

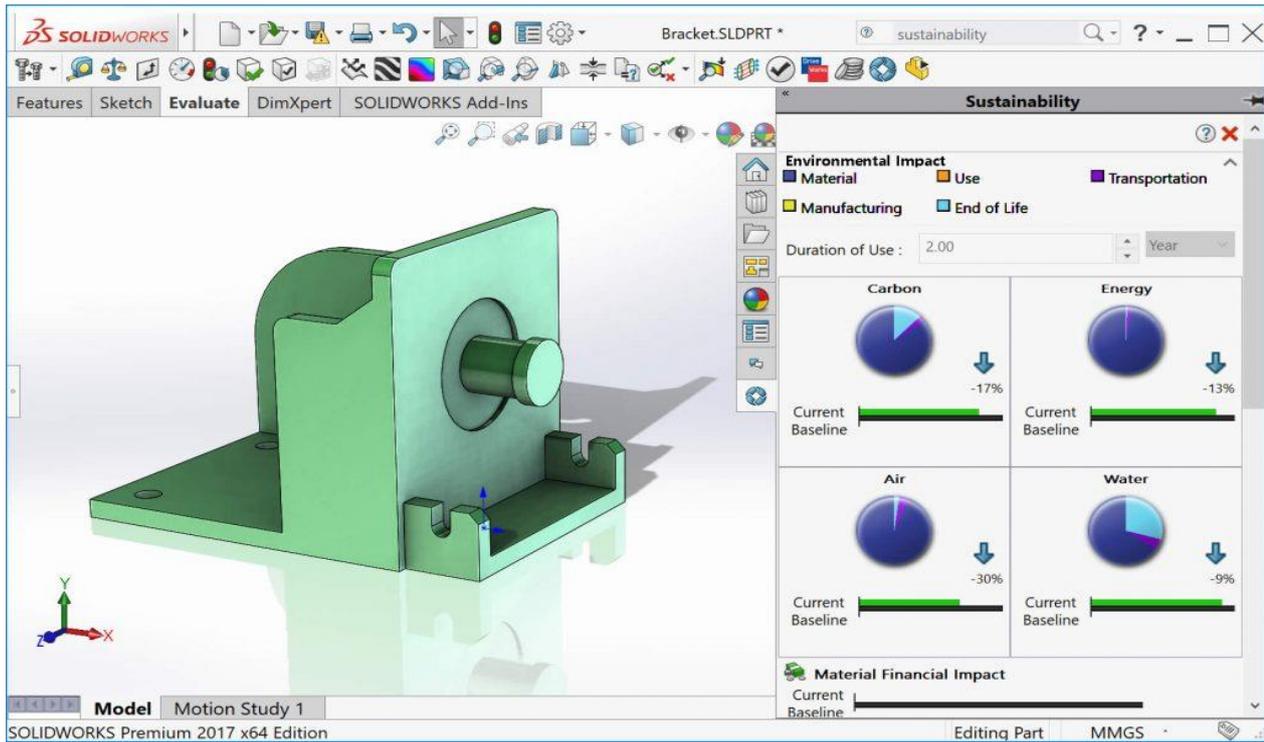


Fig. II-14 : Vue de l'interface du module *SolidWorks Sustainability*

5.2. Inventor

Inventor est un logiciel de conception mécanique puissant développée par la société américaine AUTODESK. Il contient un outil appelé *Eco Materials Adviser*, qui calcule les variables d'impacts sur l'environnement de chacune des parties d'un modèle développé en 3D (fig. II-15). Il peut en particulier :

- Assigner automatiquement des matériaux à différentes parties du modèle développé à travers les bases de données des matériaux ;
- Procéder à une analyse des indicateurs d'impact écologiques tels que les émissions de CO₂, la consommation d'énergie et l'utilisation de l'eau.
- Explorer les alternatives de conception pour voir l'impact des changements de matériaux sur les performances du modèle.

Ce type de modules demande une modélisation détaillée en 3D de la pièce, pour pouvoir évaluer l'impact environnemental du produit.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Le Logiciel Inventor comprend également un plug-in (greffon) de l'outil *Eco-Audit* qui permet à l'utilisateur d'analyser le profil environnemental du produit (en termes de kg de CO2 émis et de la consommation d'énergie).



Fig. II-15 : Le module *Eco Materials Adviser* intégré au logiciel *Inventor* donne la possibilité de calculer les variables d'impacts sur l'environnement d'un produit

5.3. CES Selector

CES® Selector développé par *Interactive Preventive Services Selector*. Il offre une base de données complète de matériaux.

L'utilisateur peut donc rapidement comparer la performance environnementale de la conception des

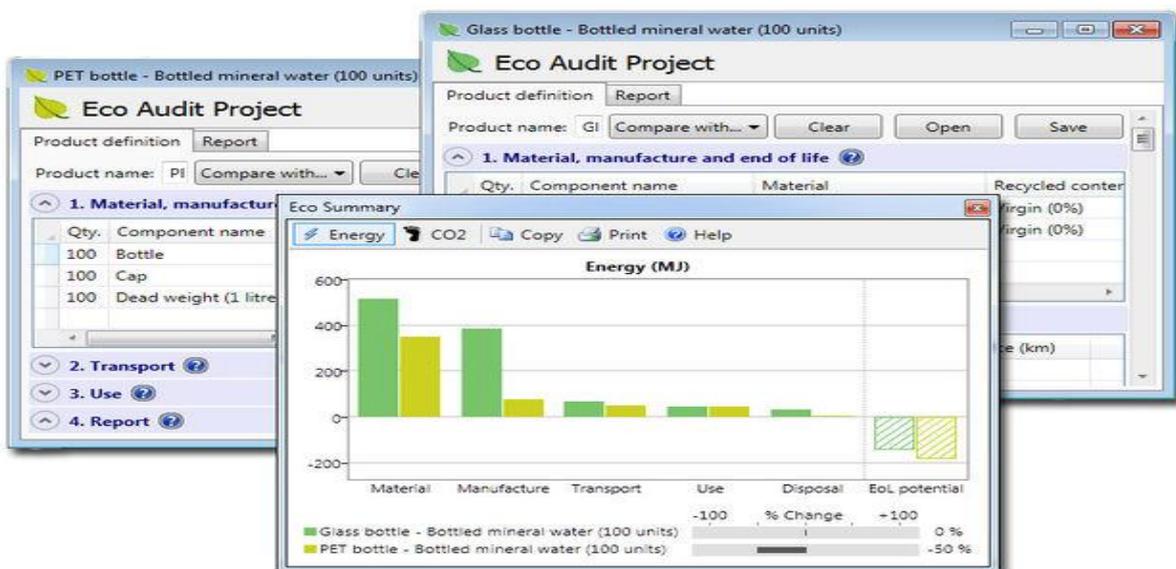


Fig. II-16 : Eco-conception avec *CES Selector*, logiciel d'audit environnemental des projets

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

produits alternatifs. La version *EDU PACK*, avec orientation académique, est une application qui permet aux enseignants et aux étudiants de comprendre les relations entre les propriétés des matériaux et des procédés afin de les appliquer à la sélection de matériaux.

L'utilisateur peut appliquer un éventail de critères numériques et de sélection graphique pour identifier quels matériaux offriront les meilleures performances pour atteindre les objectifs de conception. Parmi les outils les plus puissants figurent les graphiques comparatifs des propriétés des matériaux.

L'outil *Eco-Audit* est un module du *CES Selector* qui permet d'introduire les concepts clés de l'éco-conception et facilite l'analyse de l'impact environnemental d'un produit dans un projet.

L'utilisateur fournit les informations concernant la composition du produit, son utilisation, et son transport. Ceci est ensuite combiné avec les propriétés environnementales référencées dans les bases de données de matériaux et de procédés utilisés pour fabriquer le produit. Un rapport est ensuite créé, estimant les consommations énergétiques et les quantités de carbone (CO₂) générées pour chacune des phases de vie du produit (fig. II-16).

Le rapport peut ensuite être exporté vers différentes applications pour une analyse plus poussée. Il est également possible de comparer plusieurs Eco-Audits sur un même graphique.

L'efficacité des outils quantitatifs est limitée par la nécessité des données d'entrée détaillées, généralement indisponibles dans les premières phases du processus de conception [83].

En guise de résumé, nous reprenons sur le tableau II-4 une liste non exhaustive (arrêtée en décembre 2020) des outils logiciels de Cycle de Vie et du Potentiel de Réchauffement Global (GWP)

Il s'agit d'une liste non exhaustive d'outils logiciels pouvant être utilisés pour le calcul des impacts du cycle de vie pour un indicateur unique (GWP) ou plusieurs indicateurs (ACV)

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Tab. II-4 : Liste non exhaustive des outils GWP et ACV

Outil	Lien	Application
Athena (Canada)	http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/	Building-specific
Arquimedes (Spain)	http://arquimedes.cype.es/	Building-specific
BEES (USA)	http://www.nist.gov/el/economics/BEESSoftware.cfm/	Building-specific
Bilan Produit ADEME (France)	http://www.base-impacts.ademe.fr/bilan-produit	Generic
Carbon Footprint (UK)	https://www.carbonfootprint.com/	Generic
COCON (France)	http://eosphere.fr/COCON-comparaison-solutions-constructives-confort.html	Building-specific
eToolLCD (Australia)	http://etoolglobal.com/	Building-specific
Eco-bat (Switzerland)	http://www.eco-bat.ch/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=14&Itemid=30	Building-specific
EcoCalculator (Canada)	http://www.athenasmi.org/tools/ecocalculator/	Building-specific
EcoEffect (Sweden)	http://www.ecoeffect.se/	Building-specific
ECOSOFT (Austria)	http://www.ibo.at/en/ecosoft.htm	Building-specific
EIME (France)	http://codde.fr/en/our-software/eime-en/eime-presentation	Generic
ELODIE (France)	http://www.elodie-cstb.f/default.aspx	Building-specific
envest 2 (UK)	http://envestv2.bre.co.uk/	Building-specific
EQUER (France)	http://www.izuba.fr/logiciel/equer	Building-specific
GaBi (Germany)	http://www.gabi-software.com	Generic
GaBi-Build-IT (Germany)	http://www.pe-international.com/sweden/services-solutions/green-building/building-lca/	Building-specific
GreenCalc+ (The Netherlands)	http://www.greencalc.com/	Building-specific
Klimagassregns kap (Norway)	http://www.klimagassregnskap.no/	Building-specific
LEGEP (Germany)	http://www.legep-software.de/	Building-specific
One Click LCA (Finland)	http://www.oneclicklca.com/green-building-software/	Building-specific
OpenLCA (Germany)	http://www.openlca.org/	Generic
SimaPro (The Netherlands)	https://simapro.com/	Generic
SBS (Germany)	http://www.sbs-onlinetool.com	Building-specific
SULCA (Germany)	http://www.simulationstore.com/sulca	Generic
TEAM (France)	http://ecobilan.pwc.fr/en/team.html	Generic
Umberto (Germany)	http://www.umberto.de/en/	Generic

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

6. COMPARAISON DES OUTILS LOGICIELS D'ACV

Des outils spécifiques sont nécessaires pour réaliser une Analyse du Cycle de Vie (ACV). Il existe plusieurs outils logiciels ACV disponibles sur le marché, qui peut être acheté ou gratuit.

GaBi, openLCA, SimaPro et Umberto sont les principaux outils logiciels pour l'ACV dans le monde, toutefois Il y a d'importantes différences sur les aspects de la convivialité des outils, des principes de modélisation, et des bases de données auxquelles est relié chaque logiciel. Les résultats d'ACV obtenus dépendent énormément du logiciel choisi par l'utilisateur.

Le tableau II-6 montre les résultats de la comparaison qualitative d'un échantillon de quatre (04) outils logiciels d'ACV selon les critères explicités dans le tableau II-5.

Tab. II-5 : Liste des critères retenus pour la comparaison des logiciels	
Critère	Description
Origine et version du logiciel	Pays d'origine et version du logiciel.
Format des jeux de données	Type des formats de jeu de données pris en charge (ex : ecoSpold, ILCD, csv)
Perception de l'interface utilisateur	Description de l'interface utilisateur et les principes généraux pour la modélisation ACV.
Présentation des résultats de l'ACV	Description du traitement des Présentation et représentation des résultats de l'ACV sur l'interface utilisateur.
Analyse d'incertitude et sensibilité des résultats	Description de la gestion des incertitudes et sensibilités des résultats de l'ACV sur chaque outil du logiciel.
Soutien pour l'utilisateur	L'existence d'un canal de soutien technique, des manuels ou des tutoriels vidéo.
Aspects positifs de la modélisation	Points positifs de chaque outil logiciel d'après une comparaison croisée.
Aspects négatifs de la modélisation	Points négatifs de chaque outil logiciel d'après une comparaison croisée.
Autres aspects pertinents	Aspects restants et non repris par les critères ci-dessus.

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

Tab. II-6 : Résultats de la comparaison qualitative des outils logiciels d'ACV (Silva, D. et al. 2017)

Critère d'analyse	Gabi	openLCA	SimaPro	Umberto NXT
Origine et version du logiciel	Allemagne, ThinkStep, version 6.5.	Allemagne, GreenDelta, version 1.5.0.	Pays-Bas, PRé Consultants, version 8.2.3.0.	Allemagne, iFu Hamburg GmbH, version NXT Universel 7.1.13.
Format des jeux de données	ILCD, DEP, ecoSpold v1, GRP, gbx.	ILCD, ecoSpold v1, v2, csv, Excel, JSON- LD.	ecoSpold, csv.	Excel.
Perception de l'interface utilisateur	Utilise la modélisation de processus et les diagrammes pour chaque processus élémentaire.	Utilise la modélisation de processus et les diagrammes pour chaque processus élémentaire.	Utilise des matrices pour modéliser les processus élémentaires.	Utilise des réseaux de Petri pour la modélisation d'ACV.
Présentation des Résultats de l'ACV	Utilise des diagrammes de Sankey et des diagrammes à barres pour représenter les résultats d'ACV. Génère des tableaux et des diagrammes de flux pour l'analyse d'inventaire.	Utilise des diagrammes de Sankey et des diagrammes à barres pour représenter les résultats d'ACV, et des tableaux pour l'analyse d'inventaire.	Utilise des diagrammes de Sankey et des diagrammes à barres pour représenter les résultats d'ACV, et des tableaux pour l'analyse d'inventaire	Utilise des diagrammes de Sankey pour représenter les résultats d'ACV et des tableaux pour l'analyse d'inventaire. Les résultats peuvent être exportés à des tableaux croisés dynamiques sur Excel et des tableaux de bord.
Incertitude et sensibilité des résultats	Analyse de scénarios			
	Test Monte Carlo.			L'équipe support de Umberto peut fournir certains outils Excel qui permettent l'analyse de sensibilité.
	Pourcentage d'écart peut être utilisé pour les flux d'inventaire.	Matrice de pedigree		
		Tests de distribution de l'incertitude.	-	
Support utilisateurs	Mises-à-jours automatiques du logiciel et de la base de données, support		Mises à jours de base de données, support par messagerie, manuels et	

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

	technique par messagerie et visa le site web, manuels et tutoriels vidéo, FAQ et forum.		tutoriels, FAQ et forum.	
Aspects positifs de la modélisation	<ul style="list-style-type: none"> -Bonne documentation des jeux de données. -Possibilité de modélisation des coûts et des aspects sociaux. -Possibilité d'importation et d'exportation des jeux de données. -Accès à plusieurs bases de données professionnelles chacune contenant des centaines de jeux de données. -Possibilité de générer des fiches de déclaration environnementale de produit (DEP). 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de modélisation des coûts et des aspects sociaux. -Gratuit pour les utilisateurs. -Open source. -Possibilité d'importation et d'exportation des jeux de données. -Possibilité de partager les jeux de données en ligne. -Possibilité de générer des fiches de déclaration environnementale de produit (DEP). 	<ul style="list-style-type: none"> -Bonne documentation des jeux de données. -Possibilité de modélisation des aspects sociaux. -Intégré à la base de donnée Ecoinvent. -La plupart des jeux de données sont liés à des processus élémentaires. 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilité de modélisation des coûts. -Intégré à la base de données Ecoinvent et GaBi. -Bonne adaptation aux fonctionnalités Excel.

Le choix d'un logiciel ACV peut s'avérer une procédure complexe au regard de la diversité des logiciels présents sur le marché et des attentes de l'utilisateur en termes de modélisation. Ce sujet a déjà fait l'objet de discussions entre experts du domaine. l'idée de la réalisation d'un guide de choix de logiciel ACV selon les besoins et les utilisateurs s'avère plus que pertinente.

Ainsi, cette comparaison s'est limitée aux quatre logiciels généralistes les plus utilisés (GaBi, OPENLCA, UMBERTO et SimaPro) selon des caractéristiques élémentaires.

L'intérêt de cette comparaison est de mettre en évidence les avantages et limites de chacun des quatre logiciels, sans a priori. Il s'agit d'une objectivation des différentes performances des logiciels. Le résultat de cette comparaison est une grille synthétique récapitulant les performances des quatre logiciels pour les caractéristiques étudiées apparaissant déterminantes pour le choix. Cependant, aucun des logiciels ne se dégage, chacun présentant des avantages et des

Chapitre II : LES METHODES, LES BASES DE DONNEES ET LES LOGICIELS D'ACV

inconvénients certains. L'utilisateur effectuera, alors, son choix au regard de son besoin, des caractéristiques étudiées et des résultats attendus.

Cette comparaison n'est pas une analyse exhaustive et elle n'a pas pour objectif d'orienter l'utilisateur sur le choix d'un logiciel précis mais de présenter de façon objective les caractéristiques des logiciels comparés. Elle pourrait être étendue à d'autres logiciels généralistes ou dédiés.

7. CONCLUSION

L'examen des méthodes, bases de données et logiciels utilisés dans le domaine de l'ACV a permis d'identifier les caractéristiques de chaque instrument en conséquence de quoi, un choix pertinent et approprié au périmètre de notre étude a été opéré. Ce choix consiste à mettre en interaction l'objet de l'étude avec la méthode d'évaluation des impacts, la base de données et le logiciel d'analyse.

Pour la réalisation de l'ACV inscrite au titre de cette étude, les méthodes CML et EI99 s'avèrent les plus adéquates avec les objectifs poursuivis.

La mise en œuvre des méthodes en question s'appuie sur l'utilisation de la Base de données Ecoinvent et le Logiciel Simapro qui à travers les comparaisons opérées, ci-dessus, s'avèrent les outils les plus robustes et les plus authentiques au regard des objectifs poursuivis et de la particularité des systèmes à étudier. Dans le Chapitre qui suit, sont abordés les divers indicateurs d'impacts recherchés et leurs modes d'établissement et de modélisation.

Chapitre III

Les catégories d'impacts, les indicateurs et leur modélisation

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

1. IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN PRODUIT OU D'UN SERVICE

Tous les produits endommagent l'environnement d'une manière ou d'une autre. Les matières premières nécessaires doivent être extraites, le produit doit être fabriqué, emballé, distribué et détruit en fin de vie. L'impact environnemental d'un produit est alors toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services liés à sa production, distribution, utilisation et sa gestion en fin de vie [84].

Selon la méthode de Conception orientée Environnement (Design for Environment - DfE), pour réduire ou éliminer l'impact environnemental du produit tout au long de son cycle de vie, Ulrich fait intervenir deux type de flux [85]:

- L'énergie ;
- La matière.

Plus généralement, pour les mécanismes ou les produits fonctionnels convertisseurs d'énergie que l'on peut définir comme des produits *dynamiques*, tels que les automobiles et les produits électroniques et électriques (équipements électroménagers, équipements d'éclairage public...) les effets les plus importants se trouvent dans la phase d'utilisation à cause de la consommation élevée d'énergie.

Pour les autres produits qui n'ont pas besoin d'énergie pour fonctionner et que l'on peut appeler *statiques*, tels que les vêtements, les meubles, les pièces immobiles d'un produit à plusieurs composants [85], les effets les plus importants se trouvent dans les premières étapes du cycle de vie, où les matériaux, les procédés de production sont déterminants.

1.1. Évaluation des Impacts du Cycle de Vie -EICV

L'évaluation des impacts du cycle de vie est une étape importante de l'Analyse de Cycle de Vie, elle vise à transformer un inventaire de flux en une série d'impacts potentiels clairement identifiables. Par rapport au système de produits analysé, les résultats de cette étape peuvent servir pour :

- identifier et aider à classer les opportunités d'amélioration ;
- caractériser la performance environnementale du produit ;
- le comparer à 'autres systèmes de produits ayant la même fonction ;

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

- indiquer les points environnementaux nécessitant une action éventuelle (peut-être l'éco-conception ou la re-conception du produit).

L'évaluation des impacts s'appuie sur l'Unité Fonctionnelle, elle prend comme données d'entrée l'Analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie, c'est-à-dire une liste de flux entrants (matières premières, énergie, etc.) et sortants (rejets, déchets, émissions, etc.) agrégés sur l'ensemble du système de produit, à toutes les étapes de son cycle de vie.

Selon les normes en vigueur, les éléments suivants sont obligatoires dans la phase d'EICV :

- Sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation ;
- Attribution des résultats de l'ICV aux catégories d'impact sélectionnées (classification).
- Calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (caractérisation).

De manière schématique, la démarche générale de l'analyse de l'impact de l'inventaire du cycle

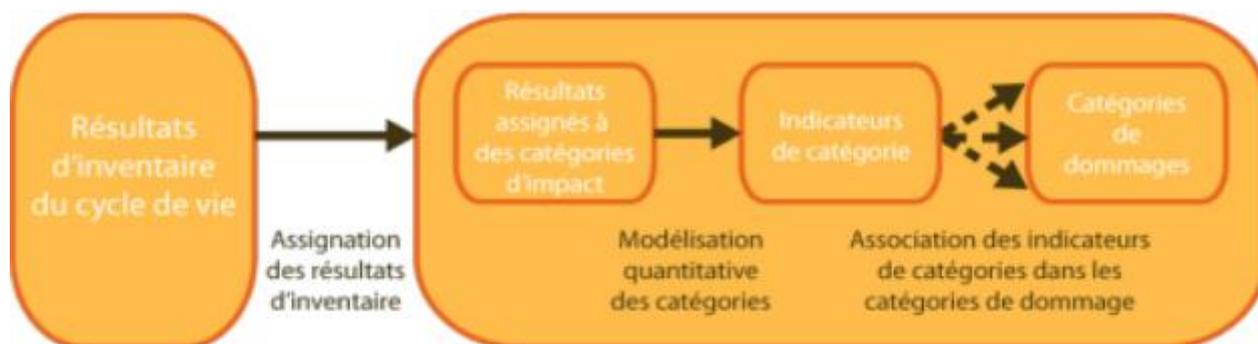


Fig. III-1 : Etapes progressives de la démarche ACV

de vie correspond à l'illustration suivante :

Ci-dessous, une représentation générique des catégories de dommages et d'impacts provenant d'un inventaire du cycle de vie d'un produit quelconque.

En outre, d'autres éléments et des informations facultatifs peuvent être utilisés en fonction des objectifs et du champ de l'étude :

La normalisation : consiste à calculer l'importance relative d'un indicateur de catégorie par rapport à une valeur de référence, qui n'est pas toujours la même selon les études. Cette étape est nécessaire pour réaliser le regroupement (classification des catégories d'impact) et la pondération. La normalisation permet de représenter les impacts sur un même graphique.

La pondération : consiste à convertir et à agréger les indicateurs de catégories en utilisant des facteurs numériques de pondération, qui dépendent des valeurs sociales, politiques et éthiques données aux catégories d'impact intermédiaires, afin d'obtenir un score unique par produit [86].

Le regroupement : tri et éventuellement classement des catégories d'impact.

L'analyse de la qualité des données : consiste à une mise en garde relative à l'ensemble des données et des informations fournies et utilisées dans la réalisation de l'ACV à l'effet d'une meilleure compréhension de la fiabilité des résultats d'indicateurs et du profil de l'évaluation de l'impact.

Ces éléments facultatifs peuvent utiliser des informations n'appartenant pas au cadre de l'évaluation à condition que l'utilisation de ces informations soit expliquée et que l'explication soit consignée.

L'application et l'utilisation des méthodes de normalisation, de regroupement et de pondération doivent être cohérentes avec les objectifs et le champ de l'ACV et doivent être complètement transparentes. Toutes les méthodes et tous les calculs utilisés doivent être documentés pour garantir la transparence.

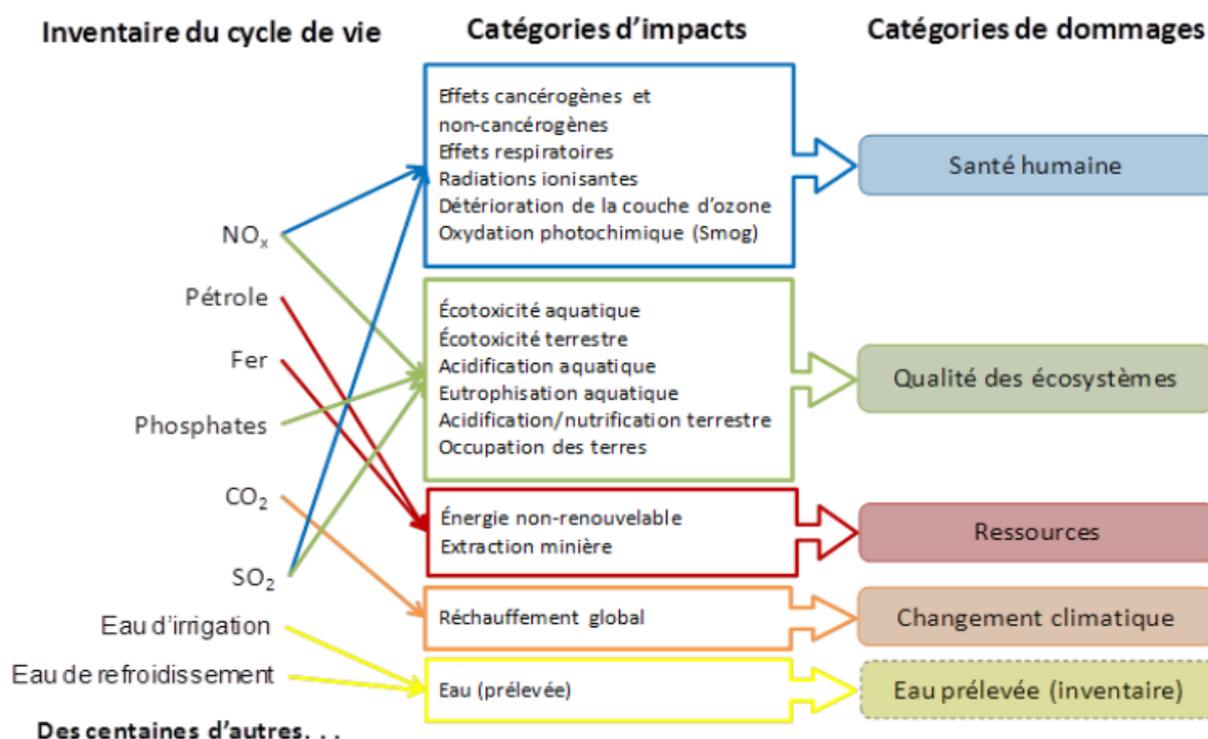


Fig. III-2 : présentation élémentaire des catégories d'impacts et de dommages provenant d'un inventaire du cycle de vie d'un produit quelconque (source CIRAIG)

2. ÉLÉMENTS OBLIGATOIRES LORS DE L'EVALUATION DES IMPACTS

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

Lors d'une étude d'Analyse du Cycle de Vie, les informations et les sources correspondantes doivent être référencées. Cette règle s'applique aussi en cas d'introduction de nouvelles catégories d'impact, de nouveaux indicateurs de catégorie ou de nouveaux modèles de caractérisation.

En plus de ces exigences, il faut prendre en compte les points suivants :

- Les paramètres doivent être acceptés à l'échelle internationale (basés sur un accord international ou approuvés par un organisme international compétent).
- Le choix de valeurs et des hypothèses formulées au cours de la sélection doit être minimisé.
- Le double comptage à moins qu'il soit requis par les objectifs et le champ de l'étude doit être évité.
- Le domaine de validité scientifique et technique des modèles de caractérisation et des facteurs de caractérisation doit être connu.

En fonction du mécanisme environnemental, des objectifs et du champ de l'étude, il faut considérer la variabilité spatio-temporelle du modèle de caractérisation qui rattache les résultats de l'inventaire à l'indicateur de catégorie. Il est recommandé aussi que le devenir ultime et le transport des substances soient intégrés au modèle de caractérisation.

2.2. Attribution des résultats de l'Inventaire du Cycle de Vie aux catégories d'impact sélectionnées (classification)

Cette seconde étape vise à classer chaque élément de l'Inventaire de Cycle de Vie dans les catégories choisies. Sauf exigence contraire fixée dans les objectifs et le champ de l'étude, la procédure d'attribution se fera en attribuant les résultats de l'ICV qui sont exclusifs d'une catégorie d'impact et en identifiant les résultats de l'ICV qui se rattachent à plusieurs catégories d'impact. Cette identification n'est pas sans difficulté car certaines substances émises peuvent avoir des impacts multiples, selon deux modes :

- **En parallèle** : par exemple le SO₂ est réparti en même temps entre les catégories d'impact d'acidification et de la santé humaine (directement toxique pour l'homme) ;

- **En série** : une substance a une conséquence nocive qui elle-même devient la cause d'autre chose; les oxydes d'azote (NO_x) sont contributeurs à la fois à la formation de l'ozone troposphérique et à l'acidification, ce qui provoque aussi une mobilisation (ou déplacement) de certains métaux, avec des effets écotoxiques et toxiques.

Il faut donc s'assurer qu'il n'y a pas redondance des sources ou des impacts.

2.3. Calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (caractérisation) :

Ce calcul implique la conversion des résultats de l'ICV en unités communes et l'agrégation des résultats convertis au sein de la même catégorie d'impact, à l'aide des facteurs de caractérisation voir l'exemple et le tableau ci-dessous.

Considérons, pour une unité fonctionnelle, les résultats suivants issus de l'ICV d'un produit : 2kg de CO₂; 20 g de CH₄; 20 g de SO₂; 5g de NO_x.

Considérons également les indicateurs d'impact de « changement climatique » (sur une durée de 100 ans), calculé selon la méthode IPCC 2007, et de « l'acidification » calculé selon la méthode CML 2001. La conversion des résultats en unité commune à chaque indicateur permet d'obtenir les valeurs indiquées ci-contre.

Tab. III-1 : Exemple de conversion des résultats d'ICV en unités communes permettant le calcul des indicateurs de catégories d'impacts moyennant deux méthodes		
Inventaire (Quantité des substances en g)	Changement climatique (100 ans)	Acidification
2000g de CO ₂	x 1 = 2000 g éq. CO ₂	/
20g de CH ₄	x 25 = 500 g éq. CO ₂	/
20g de SO ₂	/	x 1 = 20 g éq. SO ₂
5g de NO _x	/	x 0,5 = 2,5 g éq. SO ₂
Total de l'agrégation	2500 g éq. CO₂	22,5 g éq. SO₂

Le résultat du calcul est un indicateur numérique, les intrants et les extrants du système de produits sont représentés, par exemple, par :

- une compilation à part des résultats d'indicateurs de catégorie pour les différentes catégories d'impacts, appelée profil d'évaluation de l'impact de cycle de vie ;
- un ensemble de résultats d'inventaire qui constituent des flux élémentaires mais n'ont pas été affectés à des catégories d'impacts, par exemple du fait d'un manque de pertinence environnementale ;

- un ensemble de données qui ne représentent pas des flux élémentaires.

Les impacts locaux, tels que le bruit (mesuré en décibels) ou les odeurs sont des impacts non négligeables, bien que peu souvent considérés dans les outils d'évaluation actuels dont l'ACV.

3. LES INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les évaluations environnementales doivent couvrir un large ensemble d'impacts. Aucune des méthodes d'évaluation environnementale ne peut prendre en compte la totalité de ces impacts et leurs éventuelles interactions [87].

Les indicateurs d'impact environnemental ont pour objectif de représenter l'état de l'environnement, les pressions sur l'environnement (consommations de ressources naturelles, émissions...) et décrire l'évolution d'un phénomène donné pour pouvoir envisager des solutions susceptibles de limiter les impacts. Ils sont structurés en deux catégories d'indicateurs ceux dits **Problèmes, intermédiaires** ou « **midpoints** » et ceux qui relèvent de la catégorie d'**indicateurs de dommages** ou **Globaux** ou « **endpoints** ».

En fonction de leur positionnement sur la chaîne reliant les causes à l'effet, les deux catégories d'impacts structurés ont été désignés, celles dites midpoint (impact au milieu de la chaîne de causalité) qui quantifient les effets globaux des substances émises ou consommées (méthodes dites mid-point) et les méthodes « endpoint » (à la fin de la chaîne de causalité) qui se proposent de quantifier les dommages potentiels qui pourraient en résulter [88], Celles-ci sont ensuite représentées par des indicateurs de dommages.

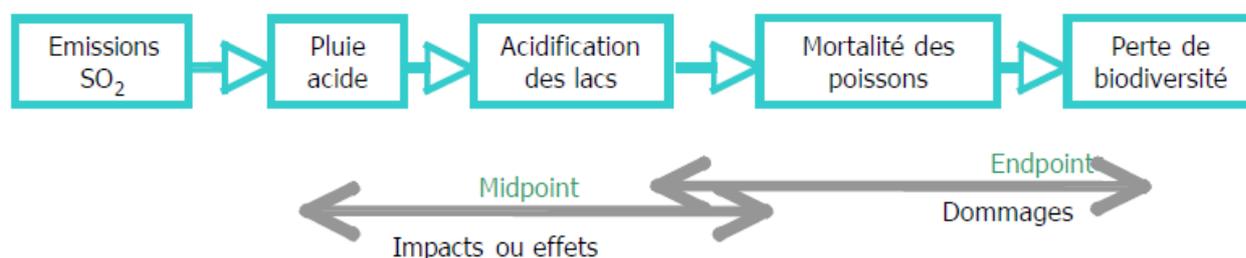


Fig. III-3 : Chaîne de causalité mettant en exergue le passage d'une émission ou d'un rejet à un impact intermédiaire (Midpoint) puis à un dommage (Endpoint)

Source : Pierre LOISEAU « Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux liés aux usages de l'eau » 2010

3.1. Les indicateurs d'impacts intermédiaires (midpoints) :

Ce sont des indicateurs d'impacts situés au milieu de la chaîne de causalité, les plus utilisés sont :

3.1.1. Epuisement des ressources non renouvelables ou « Abiotic Depletion » :

cet indicateur : mesure la consommation de ressources naturelles non renouvelables, comme le zinc, le gaz naturel, le charbon, le pétrole ;

3.1.2. Acidification « acidification » :

il calcule la perte de nutriments tels que le calcium, le magnésium ou le potassium et leur remplacement par des éléments acides. L'acidification est causée par le dioxyde d'Azote (NO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde d'Azote ou encore l'Ammoniac (NH₃) qui sont présents dans les engrais ou résultent de la combustion de fossiles lors de la production d'énergie. L'acidification perturbe les sols, l'eau, la flore et la faune et est à l'origine des pluies acides. Le potentiel d'acidification est calculé en équivalent SO₂ ;

3.1.3. Ecotoxicité « Ecotoxicity »:

indicateur mesurant l'émission des substances toxiques pour l'environnement, les animaux et qui déstabilisent ou menacent la biodiversité ;

3.1.4. Eutrophication « eutrophisation » :

elle est due à un apport excessif en nutriments et en matières organiques issus de l'activité humaine. Elle s'observe surtout dans les milieux aquatiques dont les eaux sont peu renouvelées. Stimulés par un apport substantiel en certains nutriments dont principalement le phosphore et l'azote (monoxyde et dioxyde), le phytoplancton et certaines plantes aquatiques croissent et se multiplient de manière excessive, ce qui conduit, lorsqu'ils se décomposent, à une augmentation de la charge naturelle de l'écosystème en matières organiques. Les bactéries, qui dégradent cette matière organique, prolifèrent à leur tour, en appauvrissant de plus en plus l'oxygène de l'eau avec des impacts défavorables pour la faune aquatique. Le potentiel d'eutrophisation est généralement mesuré en équivalent phosphate;

3.1.5. Toxicité des écosystèmes aquatiques d'eau douce « Freshwater Aquatic Ecotoxicity » :

indice similaire au potentiel de toxicité humaine, excepté qu'il prend en compte les organismes présents dans l'eau ;

3.1.6. Réchauffement climatique « Global Warming » :

il mesure la contribution des substances émises dans l'atmosphère au réchauffement climatique. Celui-ci est dû aux gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone (CO₂) et méthane (CH₄). Il est mesuré en équivalent CO₂ ;

3.1.7. Toxicité humaine « Human toxicity » :

il reflète les dommages potentiels des produits chimiques émis dans l'atmosphère et l'environnement pour la santé. Par exemple l'arsenic ou le fluorure d'hydrogène sont potentiellement dangereux pour la santé humaine en cas d'inhalation ou d'ingestion et sont cancérigènes. La mesure est en équivalent di-chlorobenzène, un cancérigène connu ;

3.1.8. Usage des sols « Land Use » :

il indique l'impact relatif à l'occupation et à la transformation de terres liées à des activités humaines comme l'agriculture, la construction d'habitations, de routes, d'installations électriques etc. Ce critère considère l'ampleur des changements sur un lieu.

Il est à noter que l'usage des sols peut être décomposé en deux parties, à savoir :
l'occupation des sols (en terme de superficie) et la transformation des sols.

3.1.9. Ecotoxicité marine « Marine Aquatic Ecotoxicity » :

similaire à l'écotoxicité d'eau douce, mais adapté au milieu marin.

3.1.10. Oxydation photochimique « Photochemical Ozone Creation » :

mesure la présence d'ozone au niveau du sol et de l'eau, qui, à forte concentration, est toxique pour les humains, les animaux et les végétaux. Cet indice dépend largement de la quantité de monoxyde de carbone (CO), composés organiques volatils (COV), Dioxyde de soufre, Monoxyde et Dioxyde d'azote et d'ammoniac émis. En effet, ceux-ci, sous l'effet des rayonnements ultra-violetts se transforment par réaction photochimique en ozone troposphérique et autres composants oxydants ;

3.1.11. Epuisement de la couche d'ozone « Ozone layer depletion » :

mesure le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone dans la stratosphère ;

3.1.12. Ecotoxicité terrestre « Terrestrial ecotoxicity » :

similaire au potentiel de toxicité humaine, appliqué à l'ensemble du vivant terrestre ;

3.1.13. Mise en décharge des déchets non-dangereux, radioactifs, dangereux « Non-Hazardous Waste Landfilled, Radioactive Waste Landfilled, and Hazardous Waste Landfilled » :

ces indicateurs mesurent la qualité de déchets non dangereux, déchets dangereux et déchets nucléaires engendrés par le cycle de vie d'un produit.

La chaîne reliant les causes aux effets pour les problématiques environnementales est très complexe. Généralement on distingue en termes d'impacts :

1. des effets primaires, dont les origines sont liées directement aux activités étudiées (ex.: l'émission de CFC),
2. des effets secondaires, qui sont en fait les conséquences des activités (par exemple la déplétion de l'ozone stratosphérique génère une augmentation des rayons UV touchant le sol, ce qui cause ensuite des problèmes de santé : cataracte et cancer).

3.2.Calcul des indicateurs d'impacts intermédiaires :

Les émissions et les extractions sont classées puis pondérées au sein de chaque catégorie d'impact mid-point auxquelles elles contribuent. Pour cela, des facteurs de caractérisation sont définis, ils permettent d'exprimer l'importance relative des émissions (ou de l'extraction) d'une substance pour une catégorie d'impact environnemental mid-point spécifique. Ces facteurs doivent être modélisés et validés scientifiquement. Les masses émises ou extraites de chaque substance sont multipliées par ces facteurs et sommées pour chaque catégorie d'impact afin de fournir un résultat d'impact intermédiaire (score d'impact mid-point), souvent exprimé en kilogrammes d'une substance de référence :

$$SI_i = \sum_s F \cdot I_{s,i} \times M_s$$

- SI_i le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i.
- $F \cdot I_{s,i}$ le facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie intermédiaire i.
- M_s la masse émise ou extraite de la substance "s".

À titre d'exemple, toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, méthane, HFC, CFC, etc.) peuvent être ramenées à une émission équivalente de CO₂. Le potentiel à effet de serre de 25 pour le méthane (CH₄) signifie donc qu'une émission de 1 kg de méthane équivaut à 25 kg de CO₂.

Plusieurs méthodes d'évaluation des impacts intermédiaires sont actuellement utilisées, chacune d'entre elles présente des spécificités liées aux variations spatiales des paramètres tels que la distribution de la population humaine, les écosystèmes, ou encore les zones climatiques. Il est donc

logique de retrouver, d'un pays à un autre, différentes méthodes d'évaluation des impacts qui tiennent compte de leur propre contexte, comme :

- **La méthode EDIP** (Danemark)
- **La méthode IMPACT 2002+** (Suisse)
- **La méthode TRACI** (États-Unis)
- **La méthode LUCAS** (Canada, en cours de développement)
- **La méthode CML 2001**, publiée par l'institut de Sciences de l'Environnement de l'université Leiden, au Pays bas.

3.3. Les indicateurs de dommages (endpoints):

L'agrégation des différents indicateurs intermédiaires «midpoints» permet d'obtenir des indicateurs de dommages ou endpoints, qui sont au nombre de trois (03) :

3.3.1. La santé humaine :

ce dommage est exprimé en année équivalente de vie perdue, (Disability Adjusted Life Years-DALY). C'est une unité développée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et qui permet de pondérer la morbidité et la mortalité. La morbidité relie les effets sur la santé au nombre d'années d'invalidité vécues (Years Lived Disabled, YLD) et la mortalité évalue le nombre d'années de vie perdues (Years of Life Lost, YLL). La méthode d'agrégation proposée consiste à considérer l'équivalence suivante : 1 année de vie perdue = 4 années vécues avec une invalidité ;

Plusieurs impacts intermédiaires contribuent la morbidité et la mortalité humaines.

3.3.2. La qualité des écosystèmes :

elle est exprimée en pourcentage d'espèces disparues dans certaines zones, en raison de la charge environnementale. Plusieurs impacts midpoint peuvent contribuer à endommager les écosystèmes et il faut trouver une unité commune. L'écotoxicité est exprimée en pourcentage d'espèces présentes dans l'environnement, affectées et vivant sous un stress toxique (Potentially Affected Fraction of species, PAF). Comme cela n'est pas un dommage observable, un facteur de conversion est utilisé pour traduire le stress toxique en dommages réellement observables, exprimés sous forme d'espèces disparues (Potentially Disappeared Fraction of species, PDF). L'acidification et l'eutrophisation sont également exprimées en PDF mais uniquement pour les plantes vascularisées. Il en est de même pour les impacts dus à l'aménagement du territoire.

3.3.3. L'épuisement des ressources :

il est caractérisé par le surplus d'énergie nécessaire aux futures extractions (unité : le MJ). Afin de calculer cette énergie, pour chaque type de ressource, la méthodologie s'appuie sur une technologie de réserve capable de l'extraire. Ainsi, pour la ressource en eau, la technologie employée est le dessalement de l'eau de mer.

4. METHODES DE CALCUL DE LA VALEUR DES INDICATEURS D'IMPACTS INTERMEDIAIRES (OU MIDPOINT) :

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des impacts. Leur but est de relier les données d'inventaire aux impacts environnementaux causés par les substances inventoriées.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de regrouper les résultats d'inventaires ayant des effets similaires (par exemple : l'ensemble des flux de substances inventoriées et ayant un effet sur la concentration de gaz à effet de serre) sont rassemblées, ensuite chacune des substances regroupées est convertie, avant la sommation, en unité commune par l'utilisation des coefficients de transformation (facteur de caractérisation) en substance équivalente (Par exemple : les substances contribuant l'effet de serre sont toutes convertie en Kg. éq. CO₂).

Autrement dit, les émissions et les extractions sont pondérées séparément ensuite on procède au sommation (addition) des scores individuels des substances contribuant à la même catégorie intermédiaire. (catégorie d'impact midpoint auxquelles elles contribuent).

Pour cela, des facteurs (potentiels) de caractérisation sont définis par la communauté scientifique et intégrés aux bases de données et aux logiciels dédiés comme des paramétrages de calcul. Les dits facteurs expriment l'importance relative de contribution des émissions (ou des extractions) d'une substance pour une catégorie d'impact environnemental midpoint spécifique. Ces facteurs ou coefficients (dits potentiels) doivent être validés scientifiquement et quantifiés le plus possible. La masse de chaque substance émise ou extraite est convertie en unité commune (g ou Kg par exemple) et est multipliée par son facteur de caractérisation donnant ainsi un score individuel. (Propre à une seule substance en g ou Kg de substance équivalente).

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

A l'issue, on procède à la sommation des scores individuels des substances appartenant à la même catégorie afin de fournir un résultat (un score) d'impact intermédiaire, souvent exprimé en kilogramme d'une substance de référence.

Tab. III-2 : Etapes génériques de calcul du score d'une catégorie d'impact	
Etape	Calcul à effectuer
01	Recensement des substances (inventaire ICV) avec leurs masses identifiées
02	Regroupement par catégorie d'impact (affectation de chaque substance à son catégorie d'impact)
03	Détermination du facteur (potentiel) de caractérisation de la substance
04	Calcul du score individuel d'une substance = Facteur de caractérisation de la substance x la masse de la substance
05	Indicateur d'impact intermédiaire = \sum des scores individuels des substances
$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \times M_s$	
<p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - SI_i = le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i - $FI_{s,i}$ = le facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie intermédiaire i - M_s = la masse émise ou extraite de la substance s 	

ci-dessous, sont présentées les équations génériques appliquées à chaque substance de l'inventaire et à l'établissement des indicateurs d'impacts des catégories intermédiaires objet de ce travail.

À titre d'exemple, toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, méthane, HFC, CFC...) peuvent être ramenées à une émission équivalente de CO₂ [61] avant d'être sommées.

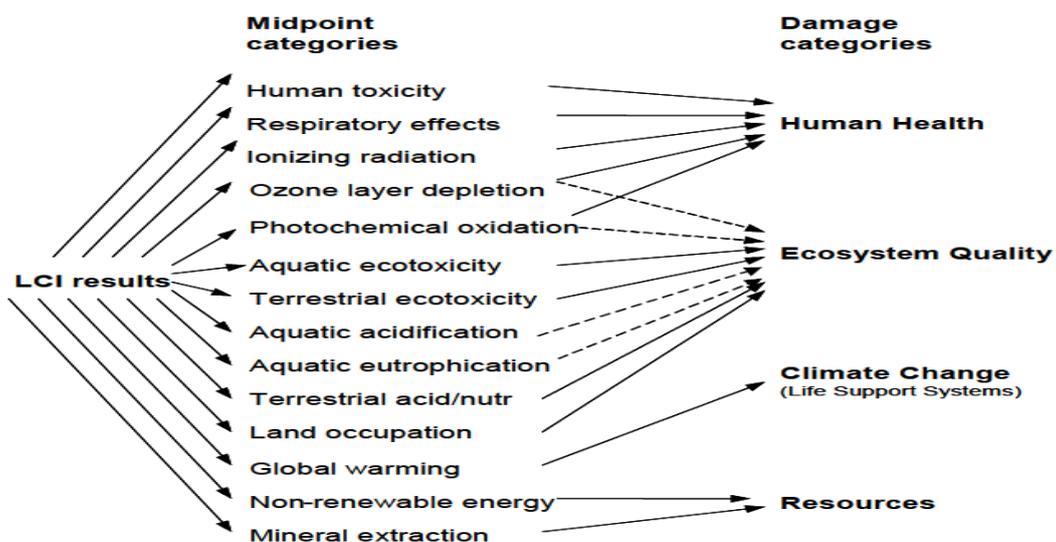


Fig. III-4 : Représentation des résultats de l'inventaire du cycle de vie (LCI), des catégories d'impacts intermédiaires (Midpoint) et des catégories de dommages (Endpoint) selon la méthode IMPACT 2002+

La démarche de détermination des facteurs/ou (potentiels), des scores individuels et des indicateurs d'impacts intermédiaires est présentée de manière détaillée dans les parties, ci-dessous, du présent chapitre.

4.1. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire du Changement/Réchauffement climatique (effet de serre) :

L'indicateur relatif aux émissions de gaz à effet de serre a pour objectif de décrire l'évolution (généralement l'augmentation) de la contribution des activités humaines (anthropiques) au phénomène d'effet de serre. Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : Kg éq. CO₂

L'atmosphère terrestre est composée de nombreux gaz d'origines naturelles et anthropiques. Certains de ces gaz provoquent le phénomène d'effet de serre en réfléchissant les radiations émises par la terre et l'empêchant de se dégager dans l'espace (à l'extérieur de couches de l'atmosphère).

Les principaux Gaz à Effet de Serre (GES) présents naturellement dans l'atmosphère terrestre sont la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde d'azote (N₂O), le méthane (CH₄), et l'ozone (O₃). Il existe également des GES d'origine uniquement anthropique comme les Halocarbures ou encore les substances contenant du Chlore et du Bromure. Certaines activités humaines sont plus émettrices de gaz à effet de serre que d'autres. De plus, l'impact sur l'effet de serre et la durée de vie dans l'atmosphère varient d'un gaz à l'autre. Cela signifie que les GES continuent à faire effet dans l'atmosphère plusieurs dizaines d'années après leur émission. C'est le phénomène d'inertie climatique.

Le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) a recensé plus d'une quarantaine de gaz à effet de serre, mais seuls six gaz précités sont considérés dans le protocole de Kyoto (Convention cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, 1997) et sont donc généralement pris en compte dans les méthodes d'évaluation environnementale. Il s'agit, donc, du Dioxyde de carbone (CO₂) qui est le premier GES émis par l'homme. On mesure d'ailleurs l'effet des autres gaz par rapport à lui en équivalent CO₂ (Kg.eq.CO₂). Il représente 77 % des émissions. Il est dû essentiellement à la combustion d'énergies fossiles au cours de divers processus (transport, industrie, agro-alimentaire, habitat, etc.), environ 6,4 GigaTonne (Gt) est due à l'agriculture et à la déforestation (le changement d'utilisation des sols par la déforestation réduit la capacité de captage du CO₂), sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 100 ans.

Le méthane (CH₄) provient essentiellement du secteur agricole, (déjections animales, élevage des ruminants, etc.), mais également des décharges (fermentation des déchets organiques), des

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

exploitations charbonnières, pétrolières ou gazières. Son potentiel de réchauffement est 20 à 25 fois plus élevé que le CO₂ mais sa durée de vie est de 10 ans.

Le secteur agricole notamment par l'épandage d'engrais azotés sur les sols et certaines industries chimiques émettent du protoxyde d'azote (N₂O).

Depuis l'ère industrielle, 3 autres familles de GES sont apparues, les gaz fluorés. Ils n'étaient pas présents naturellement dans l'atmosphère et sont uniquement dus aux activités techniques humaines. Ce sont :

- Les hydrofluorocarbures (HFC) ;
- Les hydrocarbures per-fluorés (PFC) ;
- L'hexafluorure de soufre (SF₆).

Qui sont utilisés dans les systèmes de réfrigération et de climatisation, ainsi que dans certains procédés industriels.

L'objectif du Protocole de Kyoto est de limiter l'accroissement du phénomène d'effet de serre et de ralentir la hausse des températures à la surface de la terre.

Afin de pouvoir comparer les différents gaz à effet de serre existant, le GIEC a défini : le potentiel de réchauffement mondial (PRG ou GWP Global Warming Potential). Cet indice représente l'effet combiné de l'efficacité des gaz à absorber le rayonnement infrarouge sortant ainsi que leur durée de vie dans l'atmosphère. Ce PRG permet d'estimer le pouvoir de réchauffement d'une masse de GES dans l'atmosphère par rapport à celui du dioxyde de carbone considéré comme unité de référence [89].

Cet indice est calculé sur une durée déterminée, généralement choisie arbitrairement à 100 ans. Au départ, cette durée a été fixée par la convention-cadre des Nations Unies en 1992 qui signalait aux pays qu'ils pouvaient utiliser la période de 100 ans (PRG à 100 ans) pour exprimer leurs projections en équivalent CO₂ [90].

$$\text{Impact Changement climatique}_i = \text{PRG}_i \times m_i$$

PRG_i : Potentiel de Réchauffement Global d'un GES (selon tableau III-3)

m_i : masse de la substance (gaz) émise

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

Le tableau III-3, reprend le pourcentage des émissions estimé pour chacun de ces six gaz ainsi que leurs facteurs de caractérisation (potentiels) et leurs origines anthropiques.

Tab. III-3 : Les six gaz à effet de serre selon le Protocole de Kyoto (sources MEDDTL, 2011)
PRG : Potentiel de Réchauffement Global (mondial)

Gaz	Origines	PRG à 100 ans	Part des émissions (concentrations réelles)
Dioxyde de Carbone (CO ₂)	Combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon) et de la biomasse ; des changements d'affectation des terres et autres processus industriels	1 (Gaz de référence des autres GES)	70 %
Protoxyde d'Azote (N ₂ O)	Activités agricoles ; Combustion de la biomasse et des produits chimiques comme l'acide nitrique	298	16%
Méthane (CH ₄)	Décomposition anaérobie (sans oxygène) des déchets dans les décharges ; Digestion animale ; Décomposition des déchets animaux ; Production et distribution de gaz naturel et de pétrole ; Production de charbon ; Combustion incomplète de combustibles fossiles.	25	13%
Hydrofluorocarbures (HFC)	Utilisés dans les systèmes de réfrigération et les semi-conducteurs Employés dans les aérosols et les mousses isolantes	entre 1 300 et 11 700	2%
Perfluorocarbures (PFC)	Produits dérivés de la fusion de l'aluminium et de l'enrichissement de l'uranium ; Utilisés dans la fabrication des semi-conducteurs	entre 6 500 et 9 200	
Hexafluorure de soufre(SF ₆)	Utilisé dans l'industrie lourde pour isoler les Equipements à haute tension et pour la fabrication des systèmes de refroidissement des câbles.	23 900	

Tel qu'indiqué dans le tableau III-3, les gaz fluorés ne représentent que 2% des émissions de gaz à effet de serre, mais il faut tenir compte de leurs potentiels (PRG) qui sont très largement supérieurs à ceux des trois autres gaz. Ces PRG importants, associés à leur très longue durée de vie en font d'importants contributeurs aux changements climatiques. Cet impact se calcule, pour une substance donnée selon l'Équation 1 [91] :

$$\text{Changement climatique} = \sum_i PRG_{a,i} \times m_i \quad \text{Equation 1}$$

Avec :

- PRG = Potentiel de Réchauffement Global (Facteur de caractérisation) de la substance i
- a = nombre d'année (généralement fixé à 100 ans)
- i = substance considérée

- m_i = quantité de substance i émise (en kg)

Il est, néanmoins, indispensable de prendre les précautions nécessaires et de tenir compte des limites d'utilisation de ce potentiel pour comptabiliser les émissions de GES [Global Chance, 2008].

4.2. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire d'épuisement de l'ozone stratosphérique - ODP :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : Kg CFC-11 eq./kg

L'ozone est un composé oxygéné de formule O_3 qui se crée naturellement, au niveau troposphérique, par réactions photochimiques entre différents gaz issus des activités humaines.

Au niveau stratosphérique, l'ozone est créé par l'interaction entre le rayonnement ultraviolet solaire et l'oxygène moléculaire (O_2), il joue alors un rôle essentiel dans l'équilibre radiatif.

La dégradation de la couche d'ozone est un des phénomènes affectant les équilibres planétaires [92].

Ledit phénomène (d'épuisement de l'ozone stratosphérique) est dû aux activités humaines à l'origine des émissions de substances favorables à réagir avec l'ozone stratosphérique, il est estimé à l'aide d'un indicateur qui vise à évaluer la contribution du produit étudié à cet impact (la destruction de la couche d'ozone).

Cet indicateur se calcule en agréant les émissions dans l'air des composés susceptibles de réagir avec l'ozone de la stratosphère (et notamment les chlorofluorocarbures : CFC, HCFC).

Environ 90 % de l'ozone du globe terrestre se trouve dans la stratosphère, dans une zone plus couramment appelée «couche d'ozone», située entre 15 et 35 km au-dessus de la surface de la Terre, la teneur étant maximale à 25 km.

La couche d'ozone sert de filtre aux rayons du soleil et notamment les ultraviolets dangereux pour la santé humaine (UV-B). Le « trou de la couche d'ozone » correspond à un important appauvrissement de cette couche au-dessus de l'Antarctique.

Cet appauvrissement est lié aux conditions météorologiques particulières dans l'hémisphère austral durant le printemps ainsi qu'aux émissions de composés industriels chlorés et bromés.

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

Un facteur de caractérisation (ODP : Ozone Depletion Potential) a été établi par l'Organisation Météorologique Mondiale (www.wmo.int) en 1992. Ce facteur permet d'exprimer le potentiel d'épuisement de l'ozone de différents gaz contribuant à l'impact de destruction de l'ozone stratosphérique [58] (Tableau III-4). Contrairement à l'impact sur le changement climatique, il n'a pas été retenu de durée sur laquelle ce coefficient s'applique, il est donc noté ODP[∞] (ODP à l'infini).

Selon l'Organisation Internationale de la Météorologie, l'indicateur de diminution de l'ozone stratosphérique s'exprime en référence à la molécule CFC-11 donc en kg CFC-11-Eq./kg et il se calcule, pour une substance donnée, avec l'équation 2 .

Tab. III-4 : Facteurs de caractérisation Ozone Depletion Potential (ODP) des différents gaz contribuant à l'impact « épuisement de l'ozone stratosphérique » [Guinée et al 2002]

Substance	ODP (in kg CFC-11 eq./kg)
1,1,1-trichloroethane	0.11
CFC-11	1.0
CFC-113	0.90
CFC-114	0.85
CFC-115	0.40
CFC-12	0.82
HBFC-2401*	0.25
HBFC-1201*	1.4
HALON-1202*	1.25
HALON-1211	5.1
HALON-1301	12
HBFC-2311*	0.14
HALON-2402*	7
HCFC-123	0.012
HCFC-124	0.026
HCFC-141b	0.086
HCFC-142b	0.043
HCFC-22	0.034
HCFC-225ca	0.017
HCFC-225cb	0.017
Methyl Bromide	0.37
Methyl Chloride	0.02
Tetrachloromethane	1.2

Impact de l'Épuisement de l'ozone stratosphérique = ODP_i x m_i

$$\text{Épuisement de l'ozone} = \sum_i \text{ODP}_{\infty,i} \times m_i \quad \text{Equation 2}$$

Avec :

- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise (en kg)

- ODP_i = Facteur de caractérisation (potentiel de l'Épuisement de l'ozone stratosphérique) de la substance i
- m_i = masse de la substance considérée i

4.3. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de la pollution photochimique :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : **Kg éthylène-Eq./kg**

La pollution photochimique aussi appelée pollution photo-oxydante résulte d'une réaction dans la troposphère entre les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatiles (COV) aboutissant à la formation de polluants photochimiques. Le principal polluant photochimique est l'ozone dont la présence s'accompagne par d'autres espèces aux propriétés acides ou oxydantes telles que des aldéhydes, des composés organiques nitrés, de l'acide nitrique, de l'eau oxygénée. Ce phénomène concourt à l'accroissement de la pollution par l'ozone, en hausse d'environ 1% par an sur l'ensemble de l'hémisphère nord [93].

Cette pollution, plus connue sous le terme «pic d'ozone» ou «smog photochimique» s'observe surtout en été sous l'effet du rayonnement solaire et s'observe notamment dans les régions



périurbaines, plus impactées par la pollution.

Une trop grande concentration d'ozone au niveau troposphérique peut être néfaste pour les organismes vivants. L'ozone et les polluants photochimiques sont également des espèces phytotoxiques pouvant entraîner des perturbations lors de la photosynthèse et ainsi altérer la résistance des végétaux, diminuer leur productivité, provoquer des lésions visibles. Par ailleurs, ce phénomène peut contribuer à des modifications climatiques du fait que l'ozone est un gaz à effet de serre.

Un facteur de caractérisation (POCP : Photochemical Ozone Creation Potential) permet d'exprimer la pollution photochimique [94]. De nombreuses substances sont considérées pour l'expression de cet impact, dont une partie d'entre elles sont présentées dans le tableau III-5.

Tab. III-5 : Facteurs de caractérisation (POCP) des différentes substances contribuant à l'impact « pollution photochimique » [Guinée et al., 2002]

CAS-Number: numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de Chemical Abstracts Service

Substance	comp	CAS-number	POCP (in kg ethylene eq./kg)
1,1,1-trichloroethane	air	71-55-6	0.009
1,2,3-Trimethyl Benzene	air	526-73-8	1.27
1,2,4-trimethylbenzene	air	95-63-6	1.28
1,3,5-trimethylbenzene	air	106-67-6	1.38
1,3-Butadiene	air	106-99-0	0.851
1-Butanol*	air	71-36-3	0.62
1-Butene	air	106-96-9	1.08
1-Butoxypropanol*	air	57018-52-7	0.463
1-Butyl Acetate*	air	123-86-4	0.269
1-Hexene	air	592-41-6	0.874
1-Methoxy-2-propanol*	air	107-98-2	0.355
1-Pentene	air	109-67-1	0.977
1-Propanol*	air	71-23-8	0.561
1-Propyl Benzene	air	103-65-1	0.636
1-Propylacetate*	air	109-60-4	0.282
1-Undecane	air	1120-21-4	0.384
2,2-Dimethylbutane	air	75-83-2	0.241
2,3-Dimethylbutane	air	79-29-8	0.541
2-butanone	air	78-93-3	0.373
2-Butoxy-Ethanol*	air	111-76-2	0.483
2-Ethoxy-Ethanol*	air	110-80-5	0.386
2-Methoxy-Ethanol*	air	109-86-4	0.307
2-Methyl-1-Butene	air	563-46-2	0.771
2-Methyl-2-Butene	air	513-35-9	0.842
2-Methylbutan-1-ol*	air	137-32-6	0.489
2-Methylbutan-2-ol*	air	75-85-4	0.228
2-Methylhexane	air	591-76-4	0.411
2-Methylpentane	air	107-83-5	0.42
3,5-Diethyltoluene	air	20-50-240	1.3
3,5-Dimethyl ethylbenzene	air	934-74-7	1.32
3-Methyl-1-Butene	air	563-45-1	0.671
3-Methylbutan-1-ol*	air	123-51-3	0.433
3-Methylbutan-2-ol*	air	598-75-4	0.406
3-Methylhexane	air	589-34-4	0.364
3-Methylpentane	air	96-14-0	0.479
3-Pentanol*	air	584-02-1	0.595
Acetaldehyde	air	75-07-0	0.641
Acetic acid	air	64-19-7	0.097
Acetone	air	67-64-1	0.094
Acetylene	air	74-86-2	0.085

La molécule de référence est l'éthylène. L'indicateur de pollution photochimique s'exprime donc en kg-éthylène équivalent. Il se calcule avec l'équation 3 [94].

*Impact de Pollution Photochimique*_i = *POCP*_i . *m*_i

$$\text{Pollution photochimique} = \sum_i \text{POCP}_i \times m_i \quad \text{Equation 3}$$

Avec :

- *i* = substance considérée
- *m*_i = quantité de substance *i* émise (en kg)
- *POCP*_i = *Facteur de caractérisation (potentiel de pollution photochimique) de la substance i*

4.4. Calcul de la valeur de l'impact Intermédiaire d'épuisement des ressources :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : **Kg Antimoine-eq**

La production énergétique mondiale découle à 80% des combustibles fossiles qui sont des produits issus de l'accumulation et de la transformation de matières végétales pendant des millions d'années de changements géologiques. Leurs formes principales sont le gaz, le pétrole, et le charbon. Leur combustion est une des principales sources de pollution atmosphérique et d'émission de CO₂.

Les fuites lors de la production et de transport est aussi une source de pollution terrestre et aquatique.

La raréfaction du gaz et du pétrole est un des enjeux majeurs actuels. Dans le monde plus de 70% de la consommation énergétique est à attribuer aux ressources fossiles et les modes de production et de consommations actuels reposent sur la consommation de nombreuses autres substances, organiques ou minérales, dont les ressources sont finies (non renouvelables).

Le prélèvement des ressources [95] peut être estimé par l'intermédiaire d'une analyse des flux de la quantité de matière première nécessaire à la réalisation d'un produit ou activité [96]. L'indicateur d'épuisement des ressources tient compte des consommations de ressources énergétiques ou non énergétiques (sauf l'eau) en pondérant chaque ressource par un coefficient (ADP : Abiotic resources Depletion Potential) correspondant à un indice de rareté [97] (l'antimoine a une valeur de 1 par convention) (Tableau III-6). Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine. Les ressources dont la valeur de l'indicateur est très faible (inférieure à 0,001) sont considérées comme non épuisables à l'échelle humaine [98].

$$ADP_i = \frac{DR_i / R_i^2}{DR_{ref} / R_{ref}^2}$$

Avec :

- ADP_i : Abiotic Depletion Potential d'une ressource i
- R_i : Réserve ultime de la ressource i (en kg)
- DR_i : Taux d'extraction de la ressource i (en $kg \cdot an^{-1}$)
- R_{ref} : Réserve ultime de la ressource de référence (antimoine) (en kg)
- DR_{ref} : Taux d'extraction de la ressource de référence (antimoine) ($kg \cdot An^{-1}$)

D'où pour une ressource i :

$$\text{Impact Epuisement}_i = ADP_i \cdot m_i$$

ADP_i : Facteur de caractérisation (potentiel de pollution photochimique) de la substance i

m_i : masse de la substance considérée.

La valeur de l'impact intermédiaire d'épuisement des ressources est calculée en faisant la somme pondérée (par les coefficients de rareté) des quantités consommées par le produit pendant tout son cycle de vie (Équation 4) [98]. Donc, plus cet indicateur est grand plus le produit "épuise" les ressources. Il s'exprime classiquement en **Kg-antimoine équivalent**.

$$\text{Epuisement des ressources} = \sum_i ADP_i \times m_i \quad \text{Equation 4}$$

Avec :

- i = substance considérée ;
- m_i = quantité de substance i émise ou extraite (en kg sauf pour les gaz naturels (en m^3) ou les énergies fossiles en mj) ;
- ADP_i : Facteur de caractérisation (potentiel d'épuisement des ressources) de la substance i

D'autres méthodes sont utilisées pour déterminer le facteur de caractérisation pour le calcul de la valeur de de l'impact intermédiaire d'épuisement des ressources:

Selon la méthode EI99, les facteurs de caractérisation sont rapportés à une substance de référence qui est le Fer.

$$CF_i^{2002+} = \frac{CF_i^{EI99}}{CF_{fer}^{EI99}}$$

avec :

- CF_i^{2002+} : Facteur de caractérisation de la ressource i selon Impact2002+
- CF_i^{EI99} Facteur de caractérisation de la ressource i selon EI99
- CF_{fer}^{EI99} : Facteur de caractérisation du fer selon EI99

Les facteurs de caractérisation correspondent au pouvoir calorifique supérieur (PCS) des ressources extraites (ou équivalent énergétique pour l'uranium) ; rapportés à une substance de référence (le pétrole).

$$CF_i = \frac{PCS_i}{PCS_{pétrole}}$$

avec :

- CF_i : Facteur de caractérisation de la ressource i
- PCS_i : Pouvoir calorifique supérieur de la ressource i
- $PCS_{pétrole}$: Pouvoir calorifique supérieur du pétrole

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

Tab. III-6: Facteurs de caractérisation (ADP) des différents substances, gaz, pétrole et charbon contribuant à l'impact «épuisement des ressources» [Guinée et al., 2002]
 CAS-Number: numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de Chemical Abstracts Service

Natural resource	Cas-number	ADP (in kg antimony eq./kg)	Natural resource	Cas-number	ADP (in kg antimony eq./kg)
actinium (Ac)	7440-34-8	6.33E13	polonium (Po)	7440-08-6	4.79E14
aluminium (Al)	7429-90-5	1E-8	praseodymium (Pr)	7440-10-0	2.85E-7
antimony (Sb)	7440-36-0	1	protactinium (Pa)	??????	9.77E6
argon (Ar)	7440-37-1	4.71E-7	radium (Ra)	7440-14-4	2.36E7
arsenic (As)	7440-38-2	0.00917	radon (Rn)	???	1.2E20
barium (Ba)	7440-39-3	1.05E-10	rhenium (Re)	7440-15-5	0.765
beryllium (Be)	7440-41-7	3.19E-5	rhodium (Rh)	7440-16-6	32.3
bismuth (Bi)	7440-69-9	0.0731	rubidium (Rb)	7440-17-7	2.36E-9
boron (B)	7440-42-8	0.00467	ruthenium (Ru)	7440-18-8	32.3
bromine (Br)	7726-95-6	0.00657	samarium (Sm)	7440-19-9	5.32E-7
cadmium (Cd)	7440-43-9	0.33	scandium (Sc)	7440-20-2	3.96E-8
calcium (Ca)	7440-70-2	7.08E-10	selenium (Se)	7782-49-2	0.475
cerium (Ce)	7440-45-1	5.32E-9	silicium (Si; silicon)	7440-21-3	2.99E-11
cesium (Cs)	7440-46-2	1.91E-5	silver (Ag)	7440-22-4	1.84
chlorine (Cl)	7782-50-5	4.86E-8	Sodium (Na)	7440-23-5	8.24E-11
chromium (Cr)	7440-47-3	0.000858	strontium (Sr)	7440-24-6	1.12E-6
cobalt (Co)	7440-48-4	2.62E-5	sulfur (S)	7704-34-9	0.000358
copper (Cu)	7440-50-8	0.00194	tantalum (Ta)	7440-25-7	6.77E-5
dysprosium (Dy)	7429-91-6	2.13E-6	tellurium (Te)	13494-80-9	52.8
erbium (Er)	7440-52-0	2.44E-6	terbium (Tb)	7440-27-9	2.36E-5
europium (Eu)	7440-53-1	1.33E-6	thallium (Tl)	7440-28-0	5.05E-5
fluorine (F)	7782-41-4	2.96E-6	thorium (Th)	7440-29-1	2.08E-7
gadolinium (Gd)	7440-54-2	6.57E-7	thulium (Tm)	7440-30-4	8.31E-5
gallium (Ga)	7440-55-3	1.03E-7	tin (Sn)	7440-31-5	0.033
germanium (Ge)	7440-56-4	1.47E-6	titanium (Ti)	7440-32-6	4.4E-8
gold (Au)	7440-57-5	89.5	tungsten (W); wolfram	7440-33-7	0.0117
hafnium (Hf)	7440-58-6	8.67E-7	uranium (U)	7440-51-1	0.00287
helium (He)	7440-59-7	148	vanadium (V)	7440-62-2	1.16E-6
holmium (Ho)	7440-60-0	1.33E-5	xenon (Xe)	7440-63-3	17500
indium (In)	7440-74-6	0.00903	ytterbium (Yb)	7440-64-4	2.13E-6
iodine (I)	7553-56-2	0.0427	yttrium (Y)	7440-65-5	3.34E-7
iridium (Ir)	7439-88-5	32.3	zinc (Zn)	7440-66-6	0.000992
iron (Fe)	7439-89-6	8.43E-8	Zirconium (Zr)	7440-67-7	1.86E-5
kalium (K; potassium)	7440-09-7	3.13E-8	crude oil	8012-95-1	0.0201
krypton (Kr)	7439-90-9	20.9	natural gas*	mt	0.0187
lanthanum (La)	7439-91-0	2.13E-8	hard coal	mt	0.0134
lead (Pb)	7439-92-1	0.0135	soft coal	mt	0.00571
lithium (Li)	7439-93-2	9.23E-6	fossil energy**	mt	4.81e-4
lutetium (Lu)	7439-94-3	7.66E-5			
magnesium (Mg)	7439-95-4	3.73E-9			
manganese (Mn)	7439-96-5	1.38E-5			
mercury (Hg)	7439-97-6	0.495			
molybdenum (Mo)	7439-98-7	0.0317			
neodymium (Nd)	7440-00-8	1.94E-17			
neon (Ne)	7440-01-9	0.325			
nickel (Ni)	7440-02-0	0.000108			
niobium (Nb)	7440-03-1	2.31E-5			
osmium (Os)	7440-04-2	14.4			
palladium (Pd)	7440-05-3	0.323			
phosphorus (P)	7723-14-0	8.44E-5			
platinum (Pt)	7440-06-4	1.29			

* In kg antimony/m³ natural gas

** In kg antimony/MJ fossil energy

4.5. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire d'acidification :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : **Kg SO₂-eq**

L'acidification correspond à l'augmentation de l'acidité d'un sol, d'un cours d'eau ou de l'air en raison des activités humaines. Ce phénomène peut modifier les équilibres chimiques et biologiques et affecter gravement les écosystèmes. L'augmentation de l'acidité de l'air est principalement due aux émissions de SO₂, NO_x et HCl, lesquels, par oxydation, donnent les acides HNO₃ (acide nitrique) et H₂SO₄ (acide sulfurique). Ces acides peuvent être lessivés par les précipitations et être à l'origine des pluies acides avec pH voisin de 4 à 4,5. Les composés acides se retrouvent dans les eaux de ruissellement et de surface. Cette acidification conduit à des impacts importants sur la faune et la flore.

Comme pour les autres impacts, un potentiel d'acidification (AP : Acidification Potential) est employé pour le calculer l'impact intermédiaire d'acidification de chaque substance [Heijungs et al., 1992]. Il permet d'exprimer les différentes substances sous une seule unité, le Kg de SO₂ équivalent (Tableau III-7).

Le facteur de caractérisation de l'impact acidification est le Potentiel d'Acidification (PA).

Le Potentiel d'Acidification d'une substance *i* (**PA_i**) est défini comme suit :

$$PA_i = \frac{\text{Nombre de protons produits par un kg de substance } i}{\text{Nombre de protons produits par un kg de SO}_2}$$

Avec :

PA_i : Potentiel d'Acidification d'une substance *i*

Ainsi, si la valeur du PA d'une substance est supérieure à 1, la substance est plus acidifiante que le SO₂ puisqu'elle libère plus de protons.

Grâce aux valeurs des Potentiels d'Acidifications des substances acidifiantes émises dans l'air, il est possible de calculer la valeur de leurs impacts d'acidification :

$$\text{Impact Acidification}_i = PA_i \cdot m_i$$

PA_i : Potentiel d'Acidification d'une substance *i*
m_i : masse de substance *i* émise

Les calculs sont valides pour des conditions optimales, par conséquent le Potentiel d'Acidification calcule le potentiel maximum d'acidification des substances. Cependant, dans la réalité, l'impact acidification sera très dépendant des conditions locales. Par exemple, si le taux de minéralisation du milieu récepteur est élevé, le PA réel sera plus faible que celui évalué dans les conditions optimales.

De plus, le Potentiel d'Acidification d'une substance peut également être réduit s'il y a formation d'un tampon dans le milieu récepteur, ou si les protons sont absorbés ou éliminés par la biomasse. Ces cas sont particulièrement vrais pour NOx et NHx, où la valeur d'acidification réelle peut varier entre 0 et 100% du Potentiel d'Acidification.

Pour pallier ces différences dues aux conditions locales, plusieurs méthodes d'ajustement ont été proposées :

- Négliger les émissions dans les zones non sensibles à l'acidification ;
- Pondérer les émissions selon le degré de sensibilité des zones où les molécules sont émises ;
- Analyser et comparer les résultats des deux scénarios extrêmes (acidification minimale et maximale) ;
- Tenir compte des caractéristiques du milieu récepteur et du transport des composés acides émis dans l'atmosphère.

Tab. III-7 : Facteurs de caractérisation (AP) des différentes substances contribuant à l'impact acidification [Guinée et al.,
CAS-Number: numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de Chemical Abstracts Service

Substance	CAS number	AP (in kg SO ₂ eq./kg)
ammonia	7664-41-7	1.88
hydrogen chloride	7664-01-0	0.88
hydrogen fluoride	7664-39-3	1.60
hydrogen sulfide	7783-06-4	1.88
nitric acid	7697-37-2	0.51
nitrogen dioxide	10102-44-0	0.70
nitrogen monoxide	10102-43-9	1.07
nitrogen oxides	10102-44-0	0.70
phosphoric acid	7664-38-2	0.98
sulfur dioxide	7446-09-5	1.00
sulfur trioxide	7446-11-9	0.80
sulphuric acid	7664-93-9	0.65

Parmi ces quatre propositions, la dernière a été jugée la plus adéquate car elle intègre les caractéristiques du milieu récepteur mais aussi la modélisation du transport des composés acides. En effet, ces composés, suivant les conditions météorologiques, peuvent parcourir plusieurs centaines de kilomètres et ne sont donc pas concentrés autour des lieux d'émissions (Guinée et al. 2001).

Le raisonnement, ci-dessus, pourrait être adopté lors de l'étude des potentiels (facteurs d'impact) des autres émissions.

L'indicateur acidification est retenu comme indicateur de changement climatique, en prenant comme référence la contribution à l'acidification du SO₂. Ainsi, toutes les émissions de composés susceptibles d'avoir un impact acidification sont exprimées en Kg équivalent SO₂.

La valeur de l'indicateur intermédiaire d'acidification est calculé à l'aide de l'Équation 5 [Heijungs et al., 1992].

$$\text{Acidification} = \sum_i AP_i \times m_i \quad \text{Equation 5}$$

Avec :

- i = substance considérée
- m_i = quantité de substance i émise (en kg sauf pour les gaz naturels ou les énergies fossiles)
- AP_i : Potentiel d'Acidification d'une substance i

4.6. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire d'eutrophisation :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : **kg PO₄³⁻-eq**

Le phénomène d'eutrophisation[99], bien que naturel, est accentué par l'activité humaine lorsque le milieu (écosystème) aquatique ou terrestre reçoit trop de matières nutritives assimilables par les algues et que celles-ci se prolifèrent en conduisant à une modification quantitative et qualitative dans le milieu pollué. Les principaux nutriments à l'origine de ce phénomène sont le phosphore (contenu dans les phosphates) et l'azote (contenu dans l'ammonium, les nitrates, et les nitrites). Il est donc considéré comme un impact environnemental aboutissant à des perturbations importantes des écosystèmes.

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

Comme pour les autres impacts, un potentiel d'eutrophisation (EP : Eutrophication Potential) est employé pour le calculer [Heijungs et al., 1992]. Il permet d'exprimer les différentes substances sous une seule unité, le kg PO₄³⁻ équivalent (Tableau III-8).

Le facteur de caractérisation ou le Potentiel d'Eutrophisation (PE) d'une substance *i* (PE_{*i*}) reflète la contribution potentielle d'une substance à la formation de biomasse, en la comparant à la contribution du phosphate PO₄³⁻.

$$PE_i = \frac{\text{Contribution potentielle d'eutrophisation d'une mole de substance } i / \text{Masse molaire de } i}{\text{Contribution potentielle d'eutrophisation d'une mole PO}_4^{3-} / \text{Masse molaire de PO}_4^{3-}}$$

La valeur de l'impact intermédiaire d'eutrophisation d'une substance donnée est exprimé en Kg équivalent de PO₄³⁻ et est calculée par la formule suivante :

$$\text{Impact d'Eutrophisation}_i = PE_i \cdot m_i$$

PE_i : Potentiel d'eutrophisation d'une substance *i*
m_i : masse de substance *i* rejetée dans le milieu (eau, sol, air)

Cette approche a été adoptée pour deux raisons :

- Elle permet d'obtenir un facteur de caractérisation global, indépendant des conditions du milieu ;
- Elle ne tient pas compte du milieu receveur des émissions (eau douce, eau de mer, sol, air).

Afin d'améliorer l'exactitude des phénomènes d'eutrophisation dans les conditions locales, deux propositions ont été étudiées :

- La première est de diviser les écosystèmes en sous-catégories (écosystèmes aquatiques, terrestres, carencés en azote, carencés en phosphore, etc.) ;
- La seconde est d'inclure des modélisations d'impacts à des échelles régionales.

Cela a été fait pour les émissions de NO_x et NH₃ mais seulement vers le compartiment air, or l'eutrophisation est particulièrement pertinente sur les milieux aquatiques.

Il a été proposé d'adapter la méthode pour quantifier l'eutrophisation terrestre et aquatique, cependant cela conduit à deux résultats qui ne peuvent pas être agrégés. Par conséquent, de

nombreux experts suggèrent de garder la méthode présentée, ci-dessus, car elle quantifie l'impact eutrophisation pour tous les compartiments environnementaux (Guinée et al. 2001).

L'indicateur d'eutrophisation est calculé à l'aide de l'Équation 6 [Heijungs et al., 1992].

$$Eutrophisation = \sum_i EP_i \times m_i \quad \text{Equation 6}$$

Avec :

- i = substance considérée ;
- m_i = quantité de substance i émise ;
- PE_i : Potentiel d'eutrophisation d'une substance i

Tab. III-8 : Facteurs de caractérisation (EP) des différentes substances contribuant à l'impact eutrophisation [Guinée et al., 2002]
CAS-Number: numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de Chemical Abstracts Service

Substance	CAS number	EP (in kg PO ₄ ³⁻ eq./kg)
ammonia	7664-41-7	0.35
ammonium	14798-03-9	0.33
nitrate	14797-55-8	0.1
nitric acid	7697-37-2	0.1
nitrogen	7727-37-9	0.42
nitrogen dioxide	10102-44-0	0.13
nitrogen monoxide	10102-43-9	0.2
nitrogen oxides	10102-44-0	0.13
phosphate	7664-38-2	1
phosphoric acid (H ₃ PO ₄)	7664-38-2	0.97
phosphorus (P)	7723-14-0	3.06
phosphorus(V) oxide (P ₂ O ₅)	1314-56-3	1.34
chemical oxygen demand (COD) ¹	-	0.022

4.7. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de l'écotoxicité :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : **kg 1,4-DCB-Eq** (DCB = Di-Chloro-Benzène)

La catégorie d'impact *écotoxicité aquatique*, dont il est question dans cette section, fait partie des catégories d'impact de niveau problèmes et après agrégation se retrouve dans la catégorie d'impact *qualité des écosystèmes* au niveau dommages. La Figure III-5 représente la chaîne de causes à effet pour la catégorie d'impact *écotoxicité aquatique*

L'écotoxicité est la propriété d'une substance polluante émise de provoquer des effets néfastes sur les organismes vivants ou leur physiologie (effet au niveau biochimique) et leur organisation

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

fonctionnelle (écosystème). Il existe plusieurs indicateurs d'écotoxicité selon le milieu récepteur pris en compte. Cet indicateur peut donc être décomposé en cinq (05) sous-indicateurs :

- l'écotoxicité aquatique d'eau douce pour l'eau (FAETP : Freshwater Aquatic EcoToxicity Potential) ;
- l'écotoxicité aquatique d'eau douce pour les sédiments (FSETP : Freshwater Sediment EcoToxicity Potential) ;
- l'écotoxicité aquatique d'eau de mer pour l'eau (MAETP : Marine Aquatic EcoToxicity Potential) ;
- l'écotoxicité aquatique d'eau de mer pour les sédiments (MSETP : Marine Sediment EcoToxicity Potential) ;
- l'écotoxicité terrestre (TETP : Terrestrial EcoToxicity Potential).

Le facteur de sort ou de devenir environnemental (FF) (en jour) et le facteur d'effet (EF) (en PAF.m³/kg) permettent de calculer le facteur de caractérisation (FC) (PAF.m³.j/kg) selon l'équation ci-dessous :

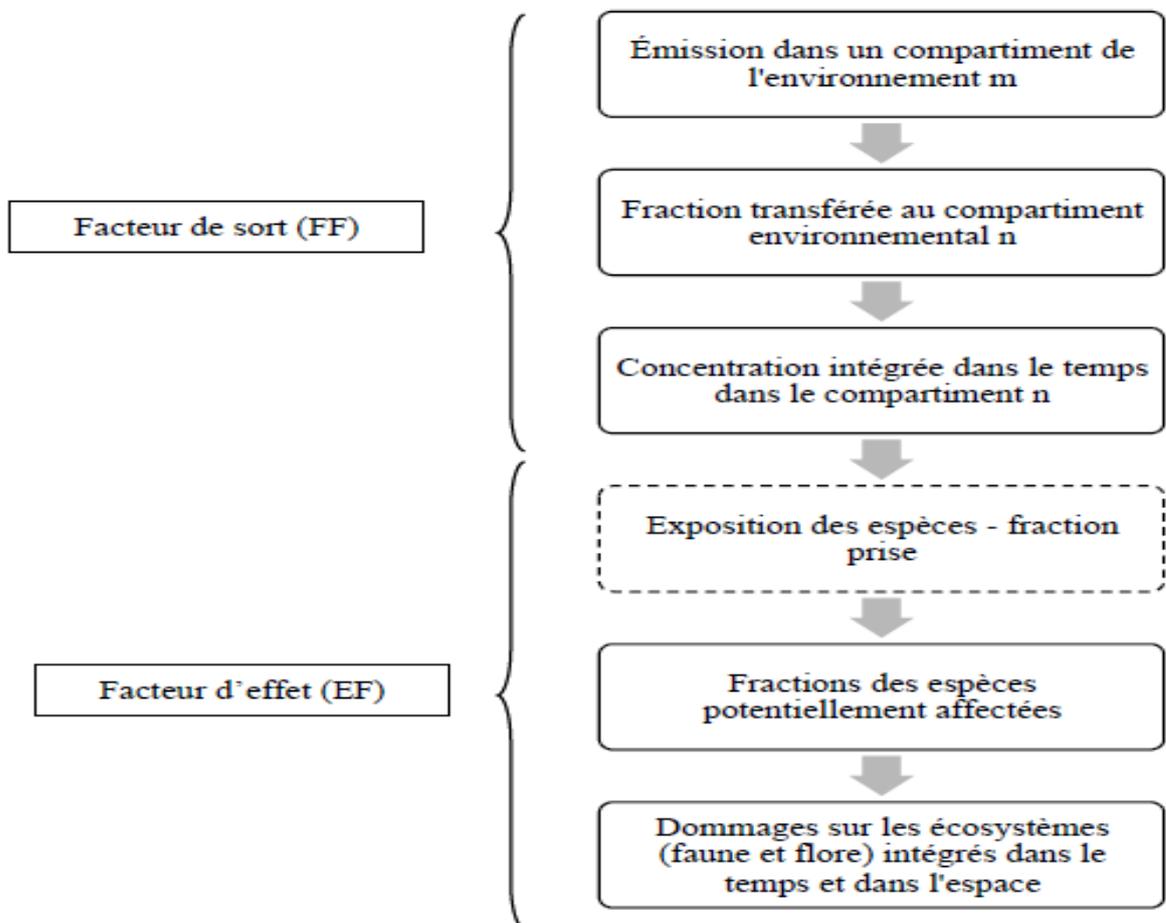


Fig. III-5 : Chaîne de cause à effet pour la catégorie écotoxicité (Adaptée de Hauschild & Pennington, 2002; Jolliet, *et al.*, 2003)

$$FC_i^{m,n} = EF_i^m \times FF_i^{n,m}$$

Où n est le compartiment de l'environnement qui reçoit une certaine quantité de polluant émis et m le compartiment d'émission de l'écosystème.

PAF : Fraction d'espèces Potentiellement Affectées.

Le facteur de sort (FF) représente le devenir dans l'environnement d'un contaminant et le facteur d'effet (EF) représente les effets négatifs ressentis par les écosystèmes suite à une exposition à une concentration de polluant. Le FC est ensuite utilisé pour déterminer les scores d'impact à partir des résultats de l'ICV.

$$\text{Score d'impact}_i^{m,n} = FC_i^{m,n} \times M_i^n$$

Où i est la substance à l'étude, M la masse de substance dans le compartiment de réception n , et m le compartiment d'émission

L'indicateur d'écotoxicité est comptabilisé en Kg de 1,4-dichlorobenzène équivalent, considérée comme substance de référence.

Les facteurs de caractérisation (FAETP, MAETP, FSETP, MSETP, TETP) de certaines autres substances contribuant à cet impact selon les cinq (05) milieux récepteurs sont mentionnés dans le Tableau III-9 [Guinée et al., 2002].

La cause (source, type de contamination) des perturbations biologiques induites par des stress chimiques in situ a été et reste une problématique de recherche récurrente en éco-toxicologie [100]

Le premier obstacle à une connaissance précise des effets de l'utilisation des substances écotoxiques (Ex. pesticides) est la faiblesse des données disponibles. Il s'agit, souvent, de manque d'enquêtes scientifiques ou d'une rétention des informations spatialisées nécessaires pour mettre en relation utilisation d'éléments écotoxiques et contamination des milieux [101]

Tab. III-9 : Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact écotoxicité (extrait du tableau [Guinée et al., 2002])
CAS-Number: numéro d'enregistrement unique auprès de la banque de données de Chemical

Substance	Comp.	CAS number	FAETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	MAETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	FSETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	MSETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)	TETP (inf) (kg 1,4-DCB eq./kg)
1,1,1-trichloroethane	air	71-55-6	1.2E-04 ¹	3.0E-01	1.0E-04	1.0E-01	1.8E-04
1,2,3,4-tetrachlorobenzene	air	634-66-2	1.0E-01	1.7E+01	1.2E-01	6.9E+00	9.9E-03
1,2,3,5-tetrachlorobenzene	air	634-90-2	7.3E-02	1.8E+01	8.1E-02	7.0E+00	1.8E-01
1,2,3-trichlorobenzene	air	87-61-6	8.5E-03	2.1E+00	9.3E-03	8.5E-01	7.5E-02
1,2,4,5-tetrachlorobenzene	air	95-94-3	7.3E-02	1.5E+01	8.5E-02	6.1E+00	2.4E-01
1,2,4-trichlorobenzene	air	120-82-1	9.9E-03	2.0E+00	1.1E-02	8.4E-01	8.8E-03
1,2-dichlorobenzene	air	95-50-1	2.9E-03	6.7E-01	2.7E-03	2.8E-01	5.3E-04
1,2-dichloroethane	air	107-06-2	1.2E-04	8.2E-02	1.0E-04	3.1E-02	2.6E-05
1,3,5-trichlorobenzene	air	108-70-3	1.6E-02	3.0E+00	1.7E-02	1.3E+00	1.9E-03
1,3-Butadiene	air	106-99-0	3.3E-07	2.7E-06	2.2E-07	3.0E-06	2.3E-08
1,3-dichlorobenzene	air	541-73-1	2.4E-03	4.6E-01	2.2E-03	2.0E-01	4.4E-04
1,4-dichlorobenzene	air	106-46-7	2.4E-03	7.4E-01	2.4E-03	2.9E-01	1.2E-02

L'indicateur d'écotoxicité est calculé à l'aide des équations 7, 8, 9, 10 et 11[59] [Huijbregts, 1999] et [Huijbregts et al., 2000].

$$\text{Ecotoxicité aquatique d'eau douce pour l'eau} = \sum_i \sum_{ecom} FAETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad \text{Equation 7}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecotoxicité aquatique d'eau de mer pour l'eau} & \quad \text{Equation 8} \\ & = \sum_i \sum_{ecom} MAETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecotoxicité aquatique d'eau douce pour les sédiments} & \quad \text{Equation 9} \\ & = \sum_i \sum_{ecom} FSETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecotoxicité aquatique d'eau de mer pour les sédiments} & \quad \text{Equation 10} \\ & = \sum_i \sum_{ecom} MSETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \end{aligned}$$

$$\text{Ecotoxicité terrestre} = \sum_i \sum_{ecom} TETP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad \text{Equation 11}$$

Avec :

- i = substance considérée ;
- $ecom$ = émission dans le compartiment considéré (eau douce, eau de mer, terre sédiments d'eaux douces, sédiments d'eaux marines, terre agricole...);

- $m_{ecom,i}$ = quantité de substance i émise dans le compartiment considéré.

En fonction du type de communication prévue à être réalisée sur les résultats, un indicateur agrégé représentant l'écotoxicité (les cinq sous-indicateurs réunis) pourra être envisagé. Ce regroupement permettra une vision globale mais engendrera une perte d'informations quant à la répartition des impacts d'écotoxicité sur les différents écosystèmes.

La caractérisation de l'impact sur l'écosystème aquatique des mélanges complexes d'hydrocarbures pour lesquels des facteurs de caractérisation n'ont pas été développés reste également une contrainte limitative pour l'EICV [102].

4.8. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de toxicité humaine :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : **Kg 1,4-DCB-Eq** (Di-Chloro-Benzène).

L'absorption de produits chimiques par un organisme peut provoquer des effets biologiques bénéfiques (exemple de l'amélioration de la santé d'un individu après absorption d'un médicament) ou néfastes (exemple d'une atteinte pulmonaire après inhalation d'un gaz corrosif) [Lapointe, 2004]. Ainsi, l'indicateur de toxicité humaine [ISO 14040, 2006] permet de montrer la capacité ou la propriété que peut posséder une substance émise pouvant causer des effets néfastes au corps humain. Ces effets néfastes correspondent à la notion d'effet toxique [Jolliet et al., 2010].

L'effet toxique néfaste est lié à divers paramètres comme la dose, le mode d'absorption, la gravité des lésions provoquées et le temps relatif à l'apparition des lésions. Ces paramètres permettent de distinguer un effet aigu (temps court d'apparition d'une lésion) d'un effet chronique (temps d'exposition long). De même, il est possible de différencier un effet local, apparu au niveau du point de contact avec la substance et un effet systémique qui induit une réponse de l'organisme à un autre endroit que le point de contact avec la substance [Lapointe, 2004].

La toxicité humaine diffère de l'écotoxicité par le fait qu'il s'agit d'un impact sur l'homme en particulier (et non sur les autres organismes vivants – faunes et flores – et l'écosystème). L'indicateur de toxicité humaine est comptabilisé en kg de 1,4-dichlorobenzène équivalent, considéré comme substance de référence. Des facteurs de caractérisation (HTP) des autres substances contribuant à cet impact sont mentionnés dans le Tableau III-10 [Guinée et al., 2002].

Il n'a pas été retenu de durée sur laquelle ce coefficient s'applique.

Tab. III-10 : Facteurs de caractérisation des substances contribuant à l'impact toxicité humaine (extrait du tableau) [Guinée et al., 2002]

Substance	Comp.	CAS number	HTP	HTP
			(inf) (kg 1,4- DCB eq./kg)	(100 yr) (kg 1,4- DCB eq./kg)
chlormequat-chloride	fresh water	999-81-5	8.3E-01	8.3E-01
fenpropimorph	fresh water	67306-03-0	1.1E+03	1.1E+03
fluroxypyr	fresh water	69377-81-7	5.0E-02	5.0E-02
epoxiconazole	fresh water	??	1.0E+02	1.0E+02
ethylene oxide	fresh water	75-21-8	1.1E+04	1.1E+04
hydrogen fluoride	fresh water	7664-39-3	3.6E+03	9.4E+00
1,1,1-trichloroethane	seawater	71-55-6	9.6E+00	9.6E+00
1,2,3,4-tetrachlorobenzene	seawater	634-66-2	3.0E+01	3.0E+01
1,2,3,5-tetrachlorobenzene	seawater	634-90-2	2.5E+01	2.5E+01
1,2,3-trichlorobenzene	seawater	87-61-6	6.2E+01	6.2E+01
1,2,4,5-tetrachlorobenzene	seawater	95-94-3	3.0E+01	3.0E+01
1,2,4-trichlorobenzene	seawater	120-82-1	5.6E+01	5.6E+01
1,2-dichlorobenzene	seawater	95-50-1	4.1E+00	4.1E+00
1,2-dichloroethane	seawater	107-06-2	5.5E+00	5.5E+00
1,3,5-trichlorobenzene	seawater	108-70-3	5.4E+01	5.4E+01
1,3-Butadiene	seawater	106-99-0	4.5E+02	4.5E+02
1,3-dichlorobenzene	seawater	541-73-1	3.0E+01	3.0E+01
1,4-dichlorobenzene	seawater	106-46-7	4.7E-01	4.7E-01
1-chloro-4-nitrobenzene	seawater	100-00-5	2.2E+02	2.2E+02
2,3,4,6-tetrachlorophenol	seawater	58-90-2	2.6E-01	2.6E-01

L'indicateur de toxicité humaine est calculé à l'aide de l'équation 12 [Huijbregts, 1999] et [Huijbregts et al., 2000].

$$Toxicité\ humaine = \sum_i \sum_{ecom} HTP_{ecom,i} \times m_{ecom,i} \quad \text{Equation 12}$$

Avec :

- i = substance considérée ;
- $ecom$ = émission dans le compartiment considéré (air, eau douce, eau de mer, terre agricole ou terre industrielle) ;
- $m_{ecom,i}$ = quantité de substance i émise dans le compartiment considéré ;
- $HTP_{ecom,i}$ = Facteur de caractérisation de la toxicité humaine (Human Toxicity Potential) d'une substance i émise dans un compartiment.

4.9. Calcul de la valeur de l'impact intermédiaire de la radiation ionisante :

Cet indicateur s'exprime par l'unité de référence : DALYs (Disability Adjusted Life Years).

Les radiations ionisantes transfèrent l'énergie dans les tissus vivants et interfèrent ainsi avec la structure des molécules. Dans les organismes vivants, cette énergie transférée peut perturber ou détruire les fonctions cellulaires ou encore changer le code génétique de ces cellules [Frischknecht et al., 2000].

Cet impact des rayonnements ionisants couvre les impacts résultant de rejets de substances radioactives ainsi que l'exposition directe à leurs radiations. Les radiations ionisantes présentent des effets indésirables. Elles sont susceptibles d'avoir un impact sur les tissus vivants, de façon immédiate ou retardée.

L'évaluation de cet effet délétère sur l'organisme est particulièrement complexe à faire.

L'exposition à ces rayonnements est nocive pour les êtres humains et les animaux, cet impact affecte donc la santé humaine, l'environnement et les ressources naturelles [Servent et al., 2005]. Certains des effets liés aux radiations ionisantes sont avant tout le résultat de la dose de radiations reçues par l'organisme. D'autres effets font suite au mode de radiation : inhalation, ingestion etc.

Les rayonnements ionisants sont exprimés en termes de nombre d'atomes désintégrés (ou décomposés) par unité de temps. L'unité internationale de la radioactivité est le Becquerel (Bq), un Bq correspondant à une désintégration par seconde. La radioactivité d'une substance est alors exprimée en Bq.kg⁻¹ ou Bq.l⁻¹.

La radioactivité décline toujours avec le temps. Le temps pris pour que la radioactivité d'une substance donnée diminue de moitié est connue comme la « demi-vie » de la substance radioactive [Servent et al., 2005].

Le facteur de caractérisation des substances contribuant à l'impact « radiation ionisante » prend en considération le compartiment dans lequel les émissions ont lieu et s'exprime en émission de Becquerel par an. Ces facteurs sont mentionnés dans le Tableau III-11.

Tab. III-11 : Facteur de caractérisation des substances contribuant à l'impact radiation ionisante [Guinée et al., 2002].

Damage factor : les émissions en Kilo-Becquerel par an

Substance	comp.	Damage factor yr kBq ⁻¹
Carbon-14 (C-14)	air	2.10E-7 ¹
Cesium-134 (Cs-134)	air	1.20E-8
Cesium-137 (Cs-137)	air	1.30E-8
Cobalt-58 (Co-58)	air	4.30E-10
Cobalt-60 (Co-60)	air	1.60E-8
hydrogen-3 (H-3)	air	1.40E-11
Iodine-129 (I-129)	air	9.40E-7
Iodine-131 (I-131)	air	1.60E-10
Iodine-133 (I-133)	air	9.40E-12
Krypton-85 (Kr-85)	air	1.40E-13
Lead-210 (Pb-210)	air	1.50E-9
Plutonium alpha (Pu alpha)	air	6.30E-8
Plutonium-238 (Pu-238)	air	6.70E-8
Polonium-210 (Po-210)	air	1.50E-9
Radium-226 (Ra-226)	air	9.10E-10
Radon-222 (Rn-222)	air	2.40E-11
Th-230	air	4.50E-8
Uranium-234 (U-234)	air	9.70E-8
Uranium-235 (U-235)	air	2.10E-8
Uranium-238 (U-238)	air	8.20E-9
Xe-133	air	1.40E-13
Ag-110m	fresh water	5.10E-10
Antimony-124 (Sb-124)	fresh water	6.20E-10
Cesium-134 (Cs-134)	fresh water	1.40E-7
Cesium-137 (Cs-137)	fresh water	1.70E-7
Cobalt-58 (Co-58)	fresh water	4.10E-11
Cobalt-60 (Co-60)	fresh water	4.40E-8
H-3	fresh water	4.50E-13
Iodine-131 (I-131)	fresh water	5.10E-10
manganese-54 (Mn-54)	fresh water	3.10E-10
Radium-226 (Ra-226)	fresh water	1.30E-10
Uranium-234 (U-234)	fresh water	2.40E-9
Uranium-235 (U-235)	fresh water	2.30E-9
Uranium-238 (U-238)	fresh water	2.30E-9
Am-241	sea water	3.10E-8
Antimony-125 (Sb-125)	sea water	1.50E-11
Carbon-14 (C-14)	sea water	1.20E-9
Cesium-134 (Cs-134)	sea water	7.90E-8
Cesium-137 (Cs-137)	sea water	7.90E-8
Cm alpha	sea water	5.70E-8
Cobalt-60 (Co-60)	sea water	3.90E-10
H-3	sea water	6.90E-14
Iodine-129 (I-129)	sea water	1.00E-7
Plutonium alpha (Pu alpha)	sea water	7.40E-9
Ru-106	sea water	1.40E-10
Sr-90	sea water	4.00E-12
Uranium-234 (U-234)	sea water	2.30E-11
Uranium-235 (U-235)	sea water	2.50E-11
Uranium-238 (U-238)	sea water	2.30E-11

La valeur de l'indicateur d'impact de radiation ionisante est exprimée en DALYs (Disability Adjusted Life Years). Les DALYs représentent les années de vie ajustées sur l'incapacité. Soit la somme des années de vie potentiellement perdues en raison d'une mortalité prématurée et des années de vie productives perdues en raison d'incapacités [Guinée et al., 2002].

L'indicateur de radiation ionisante est basé sur cette notion de DALYs et est calculé à l'aide de l'Équation 13 [Frischknecht et al., 2000].

A noter que contrairement aux autres indicateurs d'impacts, l'unité de référence retenue pour exprimer cet indicateur : le *DALYs (Disability Adjusted Life Years)* n'est pas directement reliée à une quantité de matière rejetée dans l'environnement et sa durée de vie (temps nécessaire avant sa dégradation) dans l'environnement.

$$Radiation\ ionisante = \sum_{ecompe} \sum_i Damage\ Factor_{ecompe,i} \times a_{ecompe,i} \quad Equation\ 13$$

Avec :

- i = substance considérée;
- $ecompe$ = émission dans le compartiment considéré (air, eau douce, eau de mer) ;
- $Damage\ Factor_{ecompe,i}$ = Facteur de dommage de la substance radioactive i émise dans un compartiment ;
- $a_{ecompe,i}$ = activité de la substance i émise dans le compartiment considéré (en kBq).

(L'activité d'une source radioactive se mesure en becquerels (Bq), unité correspondant au nombre de désintégrations par seconde, nommée en hommage à Henri Becquerel. On utilise quelquefois (en biologie par exemple) le nombre de désintégrations par minute - l'activité physique ou l'activité d'une source radioactive est la vitesse de désintégration du matériau radioactif la constituant. Elle correspond au nombre d'atomes radioactifs qui se désintègrent par unité de temps) (Source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Activit%C3%A9_\(physique\)\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Activit%C3%A9_(physique))))

5. L'ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX FINAUX: CATEGORIES DE DOMMAGES (ENDPOINT)

Les indicateurs agrégés sont des indicateurs couramment utilisés dans les méthodes d'évaluation environnementale car ils permettent de rendre compte d'un impact sous une unité unique. Ils rassemblent donc les impacts de différentes substances contribuant au même impact (dommage). Ils

sont calculés à partir d'hypothèses et de conventions scientifiques disponibles dans des bases de données.

Les impacts environnementaux considérés dans les méthodes d'évaluation environnementale sont fonction des objectifs de l'étude. Ils permettent d'exprimer les impacts environnementaux intermédiaires (Indicateurs Midpoint) les plus représentatifs pour le périmètre de l'étude envisagé.

5.1. Les méthodes orientées dommages et la quantification des impacts finaux (end-point)

Les méthodes orientées dommages ont pour principale vocation de regrouper les impacts en fonction des résultats dans la chaîne de cause à effet, raison pour laquelle on qualifie ces méthodes à l'aide du qualificatif "*end-point*". Leur principal avantage réside dans la capacité de montrer plus clairement l'impact. Ainsi, au lieu de parler d'émissions de gaz de type SACO : Substances Appauvrissant la Couche d'Ozone (comme les CFC), les catégories d'impact vont quantifier l'impact comme le dommage sur la santé humaine (cancers, cataractes, etc.).

Il est toutefois très difficile de suivre la chaîne de cause à effet, notamment dans le domaine biologique, en raison des durées importantes et du fait que la chaîne de causalité n'est pas toujours clairement connue. Par conséquent, les méthodes orientées problèmes seront souvent préférées. De plus, il est toujours possible de dériver les dommages finaux à partir des effets de premier ordre obtenus par les méthodes orientées problèmes.

La caractérisation des dommages permet d'évaluer la contribution des impacts *mid-point* à une ou plusieurs catégories de dommages sur un sujet à protéger. Joliet et al., dans « Analyse du cycle de vie - comprendre et réaliser un éco-bilan » et « IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology » proposent de quantifier les dommages engendrés par unité des différentes substances de référence (facteurs de caractérisation des dommages) et de les multiplier par les scores d'impacts intermédiaires, ce qui donne par somme le score de caractérisation des dommages pour chaque catégorie :

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

avec :

- SD_d = le score de caractérisation de dommages pour la catégorie d ;
- $FD_{i,d}$ = le facteur de caractérisation de dommages reliant la catégorie intermédiaire i à la catégorie de dommages d ;

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

- SI_i = Le score de l'impact de la catégorie intermédiaire i .

Par rapport aux quatre catégories de dommages prises en compte dans les méthodes *end-point*, les résultats pouvant être obtenus sont respectivement :

1. Les facteurs de dommages sur la santé humaine transforment les kg de substance équivalente en années de vie perdues (DALY).
2. Les dommages sur la qualité des écosystèmes permettent d'évaluer la fraction d'espèce disparue sur un m² durant une année.
3. Les unités de dommages des catégories "acidification" et "eutrophisation aquatique" ainsi que le "changement climatique" sont identiques aux unités de score *mid-point* (intermédiaires)
4. Pour ce qui concerne les ressources, les scores intermédiaires sont transformés en MJ/unité extraite, représentant l'énergie additionnelle devant être utilisée dans le futur à cause de la baisse des quantités de minerai dans les mines

Il est très intéressant de garder séparées les contributions à l'impact global de chacune des catégories intermédiaires. Par exemple, le score de dommages en santé humaine peut s'exprimer comme la somme des dommages générés par les polluants provoquant des effets respiratoires, les substances cancérigènes, etc.

Plusieurs méthodes de caractérisation des dommages existent, une des plus utilisées est celle appelée Eco Indicator 99. Actuellement, cette méthode a été remplacée par la méthode connue sous le nom ReCiPe. Le but de ces méthodes est de calculer trois catégories d'impacts *end-point* (ou aires de protection), respectivement la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources

La méthode IMPACT 2002 + est également une méthode de quantification de type "*end-point*". On effectue grâce à cette méthode la caractérisation des dommages compte tenu de la possibilité d'agrèger les impacts en quatre catégories distinctes, respectivement :

- les impacts sur la santé humaine : destruction de la couche d'ozone stratosphérique, radiations ionisantes, effets respiratoires et effets cancérigènes et/ou non-cancérigènes,
- les impacts sur la qualité des écosystèmes terrestres (écotoxicité et acidification), aquatiques (acidification, écotoxicité et eutrophisation) ainsi que l'occupation des sols,
- les impacts sur le changement climatique dus à l'effet de serre additionnel,
- l'utilisation des ressources, en termes d'extraction de minerais et des énergies non renouvelables (Jolliet et al.).

Pour passer à la phase suivante, une étape supplémentaire est possible afin d'attribuer les différentes catégories intermédiaires déterminées précédemment à une ou plusieurs catégories de dommages.

Les Figures III-2 et III-3 représentent le schéma général du cadre méthodologique liant les résultats d'inventaires aux catégories de dommages au travers des catégories intermédiaires [Jolliet et al., 2010]. Ces catégories considèrent les dommages sur les différents compartiments à protéger comme l'homme, le sol, l'air... La catégorie de dommages est représentée par un indicateur de dommages.

L'idée de ce cadre d'analyse est que le créateur d'une méthode d'analyse d'impact ou l'utilisateur peut choisir de s'arrêter au niveau intermédiaire ou au contraire aller jusqu'au niveau des dommages (comme prévue par : Eco-indicator 99 par exemple). La tendance sera vraisemblablement d'offrir les deux alternatives au sein d'une même méthode, comme c'est le cas dans IMPACT 2002+ [Jolliet et al., 2010].

En respectant ce cadre méthodologique, l'évaluation des impacts se déroule en trois étapes : la classification des émissions et des extractions, la caractérisation intermédiaire et la caractérisation des dommages.

L'étape de classification permet de définir une série de catégories d'impacts environnementaux intermédiaires. Les émissions et extractions de substances contribuant aux effets sur l'environnement retenus sont ensuite séparées (ou classées) dans les catégories d'impact correspondantes. Une émission peut contribuer à plusieurs catégories.

La caractérisation intermédiaire d'un polluant donné permet de pondérer les différentes émissions et extractions au sein de chaque catégorie intermédiaire auxquelles elles contribuent. Pour exprimer l'importance relative des différentes émissions au sein d'une même catégorie d'impact, les facteurs de caractérisation sont utilisés. Ces facteurs sont déterminés pour chaque substance. Ils correspondent à un calcul reliant la masse de la substance considérée au facteur de caractérisation afin d'obtenir le score de l'impact intermédiaire concerné (équation 14). Ils sont souvent exprimés en kg équivalent d'une substance de référence. C'est en appliquant cela que toutes les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, HFC, CFC, méthane,...) sont ramenées à une émission en kg équivalent CO₂.

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

Equation 14

Avec :

- SI_i = le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i
- $FI_{s,i}$ = le facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie intermédiaire i
- M_s = la masse émise ou extraite de la substance s

Pour obtenir les dommages ou « les endpoints » (santé humaine, qualité des écosystèmes et épuisement des ressources), une caractérisation des dommages doit être enchaînée. Cette seconde étape permet d'évaluer la contribution des catégories intermédiaires à une ou plusieurs catégories de dommages engendrés. Pour cela, les dommages engendrés par une unité des différentes substances de référence (facteurs de caractérisation de dommages) sont multipliés par les scores d'impacts intermédiaires (résultat obtenu par l'Équation 14), ce calcul est présenté dans l'Équation 15. L'objectif est d'obtenir le score de caractérisation de dommages pour chaque catégorie de dommages.

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

Equation 15

[Jolliet et al., 2010]

Avec :

- SD_d = substance considérée
- $FD_{i,d}$ = le facteur de caractérisation de dommages relation la catégorie i à la catégorie de dommages d
- SI_i = le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i

6. LA QUANTIFICATION DES DOMMAGES (OU IMPACTS ENDPOINT)

La caractérisation des dommages permet d'évaluer la contribution des impacts Midpoints à une ou plusieurs catégories de dommages finaux/Endpoints (santé humaine, qualité des écosystèmes et épuisement des ressources).

Les trois types de dommages sont en lien de causalité avec les catégories d'impacts intermédiaires :

6.1. La Santé humaine

est la conséquence des problèmes de :

- La toxicité humaine ;
- Les effets respiratoires ;

- L'oxydation photochimique (Effets cancérogènes) ;
- L'appauvrissement de la couche d'ozone ;
- Les rayonnements ionisants.

6.2. La qualité des écosystèmes

est la conséquence des problèmes de :

- L'écotoxicité aquatique;
- L'écotoxicité terrestre ;
- L'acidification aquatique;
- L'eutrophisation aquatique;
- L'occupation des terres ; et
- L'oxydation photochimique (Effets cancérogènes) ;
- L'appauvrissement de la couche d'ozone.

6.3. Le changement climatique

est la conséquence des problèmes du :

- Réchauffement climatique.

6.4. L'épuisement des ressources

est la conséquence des problèmes de :

- La consommation d'énergies non renouvelables ;
- L'extraction minérale.

Il faut alors quantifier les dommages engendrés par les différentes substances de référence. Cela revient à mettre au point des facteurs de caractérisation de dommages pour chaque substance de référence définie dans la phase de caractérisation des impacts intermédiaires. Ces facteurs de caractérisation sont multipliés par les résultats d'impacts intermédiaires, ce qui donne par somme le score de caractérisation des dommages pour chaque catégorie (Jolliet et al. 2005).

Il existe plusieurs méthodes de caractérisation des dommages. Une des plus utilisées est celle développée par **Eco Indicator 99** qui repose sur trois impacts endpoints (les impacts endpoint peuvent aussi s'appeler aires de protection).

Eco-Indicator 99 fournit également les facteurs de caractérisation des dommages selon trois approches [103], à savoir :

1. Effet hiérarchique;

2. Effet égalitaire ;
3. Effet individualiste

La perspective Hiérarchiste : seuls les faits reconnus par les autorités scientifiques et politiques sont inclus dans le modèle.

La perspective Egalitaire : le principe de précaution est d'application. Toute substance supposée constituer un risque est prise en compte dans ce modèle. Il entraîne une perspective à très long terme et une grande incertitude sur les données.

La perspective Individualiste : seules les relations de cause à effet prouvées sont incluses dans le modèle. La perspective adoptée est alors à court terme (les effets à long terme pouvant être réduits au vu des avancées de la science et des techniques).

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

Tab. III-12 : Facteurs de caractérisation des dommages selon 3 approches

<i>Dommage (Endpoint)</i>	<i>Unité</i>	<i>Facteur de normalisation</i>		
		<i>Hiérarchiste</i>	<i>Egalitaire</i>	<i>Individualiste</i>
<i>Santé humaine</i>	<i>DALYs : Disability-Adjusted Life Years</i>	<i>1,54E-02</i>	<i>1,55E-02</i>	<i>8,25E-03</i>
<i>Qualité de l'écosystème</i>	<i>PDF : Potentially Disappeared Fraction par Mètre carré par année</i>	<i>5,13E+03</i>	<i>5,13E+03</i>	<i>4,51E+03</i>
<i>Ressources</i>	<i>MJ : Mili-joule</i>	<i>8,41E+03</i>	<i>5,94E+03</i>	<i>1,48E+02</i>

6.5. Calcul des indicateurs de dommages

6.5.1. Calcul de la valeur de l'indicateur de dommage «santé humaine »

Ce dommage est exprimé en année équivalente de vie perdue, (Disability Adjusted Life Years, DALY). C'est une unité développée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et qui permet de pondérer la morbidité et la mortalité. La morbidité relie les effets sur la santé au nombre d'années d'invalidité vécues (Years Lived Disabled, YLD) et la mortalité évalue le nombre d'années de vie perdues (Years of Life Lost, YLL). La méthode d'agrégation proposée consiste à considérer l'équivalence suivante : 1 année de vie perdue = 4 années vécues avec une invalidité (Goedkoop & Spriensma 2000).

Les facteurs de caractérisation pour calculer la valeur du « dommage santé humaine » [103] sont arrêtés selon trois (03) approches :

1. Effet Hiérarchique : 0.0154 DALYs(0,0) (40%),
2. Effet Egalitaire : 0.0155 DALYs(0,0) (30%),
3. Effet Individualiste : 0.00825 DALYs(0,1) (55%)

6.5.2. Calcul de la valeur de l'indicateur de dommage «qualité des écosystèmes»

Elle est exprimée en pourcentage d'espèces disparues dans certaines zones, en raison de la charge environnementale. Plusieurs impacts Midpoints peuvent endommager les écosystèmes et il faut trouver une unité commune.

L'écotoxicité est exprimée en pourcentage d'espèces présentes dans l'environnement affectées et vivant sous un stress toxique (Potentially Affected Fraction of species, PAF). Comme cela n'est pas un dommage observable, un facteur de conversion est utilisé pour traduire le stress toxique en dommages réellement observables, exprimés sous forme d'espèces disparues (Potentially Damage Fraction of species, PDF). L'acidification et l'eutrophisation sont également exprimées en PDF mais uniquement pour les plantes vascularisées. Il en est de même pour les impacts dus à l'aménagement du territoire (Jolliet et al. 2005).

Les facteurs de caractérisation pour calculer le « dommage qualité des écosystèmes» [103] sont :

1. Effet Hiérarchique : 5130 PDF*m2*a (40%) ;
2. Effet Egalitaire : 5130 PDF*m2*a (50%) ;
3. Effet Individualiste : 4510 PDF*m2*a (25%).

6.5.3. Calcul de la valeur de l'indicateur de dommage «épuiement des ressources»

Il est caractérisé par le surplus d'énergie nécessaire aux futures extractions (unité : le MJ).

Afin de calculer cette énergie, pour chaque type de ressource, la méthodologie s'appuie sur une technologie de réserve capable de l'extraire (Goedkoop & Spriensma 2000). Ainsi, pour la ressource en eau, la technologie de réserve employée est le dessalement de l'eau de mer.

Selon la méthode EI99, les facteurs de caractérisation pour les minéraux correspondent aux surplus d'énergie qui seront nécessaires à l'extraction des ressources dans le futur, comme exprimé dans l'équation suivante :

$$\Delta E_i = E_{future_i} - E_{actuelle_i}$$

Avec :

- ΔE_i : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i (en MJ) ;

- $E_{actuelle_i}$: Energie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement ;

- E_{future_i} : Energie nécessaire pour extraire la ressource i à l'avenir.

Les auteurs définissent ce point dans le futur comme le moment où la quantité extraite cumulée de la ressource i aura atteint 5 fois la quantité extraite cumulée avant 1990.

Pour les ressources fossiles, les facteurs de caractérisation sont définis pour 3 perspectives : «égalitaire», « Hiérarchiste » et « Individualiste ». Pour chaque perspective, on définit une ressource de remplacement (j) à chaque ressource actuelle (i), puis on fait la différence entre les énergies d'extraction pour calculer le surplus, comme exprimé dans l'équation suivante :

$$\Delta E_i = E_j - E_i$$

Avec :

- ΔE_i : Surplus d'énergie pour l'extraction de la ressource i (en MJ) ;

- E_i : Energie nécessaire pour extraire la ressource i actuellement ;

- E_j : Energie nécessaire pour extraire la ressource de remplacement j .

On peut noter que pour la perspective « Individualiste », les facteurs sont tous nuls, car on ne considère pas de changement de ressources fossiles dans cette perspective.

Les facteurs de caractérisation pour calculer le « dommage épuisement des ressources» [103] sont :

1. Effet Hiérarchique : 8410 MJ (20%);
2. Effet Egalitaire : 5940 MJ (20%) ;
3. Effet Individualiste : 150 MJ (20%).

Le calcul de l'indicateur endpoint « épuisement des ressources » consiste à :

- Exprimer, en unité d'énergie, les indicateurs de :

1. Extraction du minéral « Mineral extraction »; et
2. Consommation d'énergie non renouvelable «Non-renewable energy consumption» sans considérer la substance de référence

- Sommer les deux indicateurs

Ainsi, les facteurs de caractérisation correspondent au surplus d'énergie (selon EI99) pour les minéraux et au Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) pour les ressources énergétiques.

6.6. Normalisation des indicateurs de dommages :

Chapitre III : LES CATEGORIES D'IMPACTS, LEURS INDICATEURS ET LEUR MODELISATION

La normalisation des indicateurs de dommages (Endpoint) se fait sur la base des facteurs de normalisation fournis par la méthode IMPACT 2002+, comme précisé sur le tableau III-13.

Tab. III-13 : des facteurs de normalisation fournis par la méthode IMPACT 2002+

Damage categories	Normalization factors for damage categories (NF ^d)				Unit
	version 1.0 & 1.1	version 2.0	version 2.1	version Q2.2	
Human Health	0.0077	0.0068 ¹⁶	0.0071 ¹⁷	0.0071 ¹⁸	DALY/point
Ecosystem Quality	4'650	13'700 ¹⁹	13'700	13'800	PDF.m ² .y/point
Climate Change	9'950	9'950	9'950	11'600	kg CO ₂ into air/point
Resources	152'000	152'000	152'000	152'000	MJ/point

7. Conclusion :

La combinaison des méthodes d'analyse de cycle de vie permet, après la réalisation de l'inventaire des intrants et des extrants d'un produit, d'un service ou d'un processus, de mesurer à travers des indicateurs le niveau de pression et des effets du système étudié sur les divers compartiments de l'environnement.

Les méthodes d'ACV permettent également, à travers des facteurs d'impacts, d'agréger les indicateurs appelés intermédiaires ou « problèmes » (Midpoints) pour déterminer des indicateurs de dommage (Endpoints) représentant les conséquences sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes, changement climatique et l'épuisement des ressources naturelles.

Il est également possible, notamment pour des besoins de communication, de procéder à la normalisation et/ou la pondération à travers les facteurs de normalisation et/ou de pondération de chaque catégorie de dommages pour obtenir un score unique et global mesuré en nombre de points.

Les scores Midpoint et Endpoint calculés de manière raisonnable et avec suffisamment de diligence permettent de comparer les performances environnementales entre des produits, des techniques, des processus et d'apprécier une évolution de l'efficacité environnementale sur une échelle de temps.

Le schéma, ci-après, synthétise le processus d'évaluation partant de la réalisation de l'inventaire du cycle de vie à l'évaluation des catégories d'impacts intermédiaires jusqu'à l'agrégation et la détermination des catégories de dommages et la normalisation.

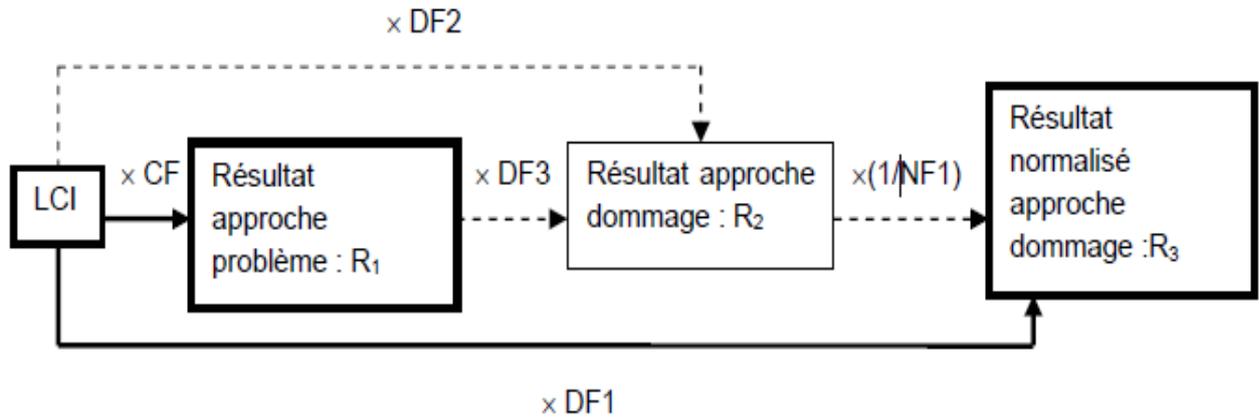


Fig. III-6 : Schéma d'évaluation d'impacts selon la méthode « impact 2002+ », les liaisons en pointillé sont très incertaines

- *LCI* : résultat d'inventaire [kg ou Bq ou $m^2 \times an$ ou MJ] ;
- *CF* : facteur de caractérisation de l'approche problème (par exemple le GWP pour l'Effet de Serre) [adimensionnel] ;
- *R₁* : résultat approche problème (indicateurs des impacts intermédiaires) en [kg *éq.* substance de référence] ;
- *R₂* : résultat approche dommages (indicateurs de dommages) [DALY ou PDF $\times m^2 \times an$, kg *éq.* CO₂ ou MJ] ;
- *DF1* : facteur de dommage normalisé [points / kg ou Bq ou $m^2 \times an$ ou MJ] ;
- *DF2* : facteur de dommage pour la catégorie intermédiaire considérée [DALY ou PDF $\times m^2 \times an$, kg *éq.* CO₂ ou MJ / kg ou Bq ou $m^2 \times an$ ou MJ] ;
- *DF3* : facteur de dommage pour la substance de référence et pour la catégorie intermédiaire considérée [DALY ou PDF $\times m^2 \times an$, kg *éq.* CO₂ ou MJ / kg substance de référence] ;
- *NF* : facteur de normalisation pour la catégorie de dommage considérée [DALY ou PDF $\times m^2 \times an$, kg *éq.* CO₂ ou MJ / points] ;
- *R₃* : résultat normalisé approche dommages [points].

Chapitre IV

***ACV comparative entre
luminaires
conventionnels et
luminaire à LED et
perspectives
d'optimisation des
impacts
environnementaux***

Chapitre IV : ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS (SHP) ET LUMINAIRE A « LED » ET PERSPECTIVES D'OPTIMISATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

• ETUDE PREALABLE SOULIGNANT L'IMPORTANCE D'UNE ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A LED

.1. Introduction:

L'éclairage public offre plusieurs avantages liés à la sécurité et au confort notamment dans les zones urbaines, toutefois il représente actuellement plus de 40% du budget des collectivités et environ 12% de la consommation électrique globale.

L'éclairage classique des voiries consiste à un éclairage statique basé sur la mise en fonctionnement des luminaires qui émettent un éclairement constant tout au long de la nuit même en l'absence des usagers de l'espace public.

Ce mode d'éclairage fonctionnant plus de quatre mille heures (4000 h) par année se caractérise par :

- Le gaspillage de l'énergie due au mode, à la durée d'utilisation et aux sources lumineuses énergivores;
- L'usure rapide des équipements engendrant des coûts de maintenance plus importants;
- Les nuisances lumineuses (pollution lumineuse);
- Les impacts environnementaux divers.

Outre les divers impacts du gaspillage de l'énergie, des études ont montré que, l'éclairage (résidentiel et non résidentiel) est responsable de 5% des émissions de gaz à effet de serre (GES) [104].

La prise de conscience accrue des enjeux environnementaux ainsi que les coûts importants de l'énergie ont poussé les professionnels à rechercher et mettre en place des solutions plus appropriées aux exigences actuelles.

Le développement technologique offre actuellement des solutions innovantes en matière de ressources lumineuses ainsi que de gestion efficace et rationnelle des réseaux d'éclairage public visant à optimiser la consommation tout en réduisant les impacts environnementaux et en maintenant un très haut niveau de confort.

Chapitre IV : ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A « LED »

Cette étude d'analyse du cycle de vie comparative entre deux technologies d'éclairage public, explique, dans une première phase la naissance d'un problème environnemental qui est «la pollution lumineuse» [105], illustre, ensuite, les impacts environnementaux, énergétiques et économiques des systèmes d'éclairage public classique et présente également les solutions émergentes ayant fournies des performances susceptibles de rendre la mise en place, le fonctionnement, la maintenance et la gestion de fin de vie de moins en moins polluants avec une optimisation de la consommation énergétique et des coûts liés aux différentes phases du cycle de vie des installations.

L'ensemble des phases du cycle de vie du système d'éclairage public [99], ci-dessous :

- La production, le transport et la distribution de l'électricité;
- La fabrication des composants du système et la mise en place des installations d'éclairage public;
- L'utilisation, la gestion et la maintenance du système;
- La fin de vie des installations et la gestion des déchets.

Contribuent de différentes manières à la production d'impacts environnementaux plus au moins critiques.

L'examen de l'état des lieux a montré que les systèmes d'éclairage public dominants jusqu'à la première décennie des années 2000 se caractérisent par :

- Utilisation excessive de luminaires énergivores avec un fonctionnement à pleine régime du coucher de soleil au petit matin, avec des intensités inutiles durant une bonne partie de la nuit;
- Des dispositions réglementaires et normatives régissant l'éclairage public n'accordent pas suffisamment d'intérêt pour les aspects environnementaux [105];
- Une gestion classique (manuelle) des installations;
- Une forte production de nuisances lumineuses impactant la faune, la flore et la santé humaine (pollution lumineuse);
- Un accroissement du volume des déchets.
- Un coût économique d'utilisation et de maintenance fortement élevé ;

Les données collectées auprès des collectivités locales montrent que l'éclairage public constitue actuellement plus de 12% de la consommation électrique globale et plus de 40% du budget des collectivités.

Considérant que les impacts environnementaux directs et indirects engendrés par l'éclairage public sont devenus de plus en plus accrus et complexes, la problématique qui se pose consiste à apporter des solutions durables conciliant avantages offerts par les installations d'éclairage (confort,

sécurité...) avec des impacts environnementaux minimes et prouvés. Autrement dit, il s'agit d'apporter des solutions et des réponses à la question :

- **Comment concilier confort, sécurité et bien être offerts par l'éclairage public avec des impacts environnementaux minimes ?**

.2. Objectifs de l'étude :

L'objectif de l'étude est

- D'évaluer, analyser, comparer et interpréter les impacts environnementaux de deux systèmes d'éclairage public.
 - Système basé sur une technologie conventionnelle (Luminaire à Lampe SHP);
 - Système basé sur une technologie moderne (Luminaire à circuit LED).
- De déterminer les performances environnementales et énergétiques de chaque système ainsi que les pistes d'optimisation et d'amélioration.

La réalisation de ces objectifs permet d'obtenir des éléments de décision permettant un choix judicieux pour l'adoption d'un système d'éclairage public durable mettant en usage des luminaires et des sources lumineuses économiques plus respectueuses de l'environnement, moins polluants et à durée de vie plus longue [106] en remplacement des lampes énergivores à incandescences (à mercure, à sodium...).

Par ailleurs, la durabilité des installations d'éclairage public ne pourrait être cernée sous une vision holistique et d'ensemble intégrant la prise en considération de l'ensemble du cycle de vie, la mise en exergue des imperfections énergétiques et environnementales de chaque phase pour pouvoir dégager ultérieurement les solutions idoines susceptibles d'optimiser l'efficacité énergétiques et les performances environnementales.

En ce sens que, dans une seconde phase, l'étude aura pour objectif, également, d'étaler l'apport des avancées techniques et particulièrement celui de la smart technologie et de la smart cité quant au perfectionnement des installations d'éclairage publique qui devraient, indépendamment de leur rôle d'assurer le confort et la sécurité durant la nuit, produire une multitude de fonctions facilitatrices de la vie du 21ème siècle (télésurveillance, borne de recharge, réseau wifi, divers capteurs...).

Afin de mieux étoffer cette étude, une partie consacrée au processus modernes de traitement de fin de vie des déchets des luminaires d'éclairage sera insérée dans le dernier chapitre de cette étude.

Dans l'objectif d'une meilleure compréhension de l'étendue de l'étude, une présentation des éléments composants le système d'éclairage public s'avère indispensable, ne serait ce qu'à la limite des éléments couverts par le champ de cette étude.

.3. Présentation globale d'un système d'éclairage public et limites du système étudié :

Afin d'arrêter avec précision les limites du système à étudier un examen approfondie des systèmes d'éclairage public, notamment ceux déployés en Algérie, a été réalisé en se basant sur des données fournies par des experts et des organismes spécialisés (SONELGAZ, ERMA, Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique...).

La section, ci-après, mis en exergue des éléments préliminaires pertinents pour le cadrage technique de cette partie de l'étude.

Une installation d'éclairage public routier est généralement constituée des principaux équipements suivants :

1. armoire ou coffret d'électricité servant à commander et à protéger et contrôler le réseau ;
2. des câbles électriques servant à transporter l'électricité à partir des sources d'alimentation (armoire (Coffret de Commande et de Protection - CCP));
3. des points lumineux (lampadaires) qui éclairent l'espace public (la route pour notre cas);
4. les câblages de liaison des composants du CCP.

.3.1. Armoire d'éclairage public :

également appelé coffret d'électricité ou Coffret de Commande et de Protection (CCP) permettant l'alimentation du réseau d'éclairage public à partir du réseau public de distribution d'énergie. Comme illustré sur la fig. IV-1, Il renferme des équipements ou dispositifs de comptage, de commande et de protection. Une armoire est généralement constituée d'une partie pour le comptage de la consommation électrique, une partie de commande d'allumage des points lumineux contenant des composantes telles que les détecteurs crépusculaires ou horloges astronomiques et les contacteurs, comportant tous les appareils de protection (disjoncteur, fusibles...) [107].

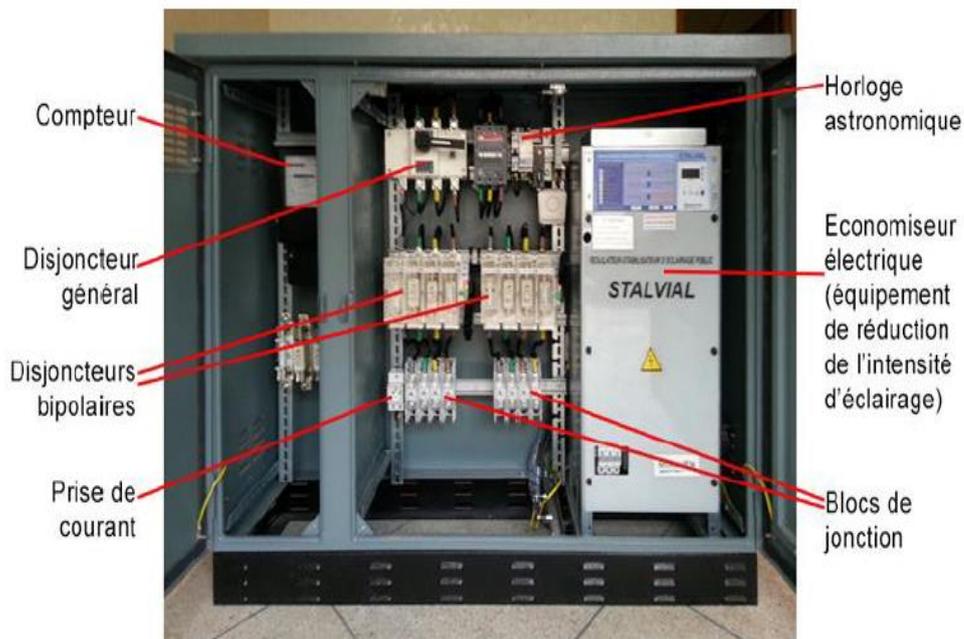


Fig. IV-1 : Les composants d'un coffret de commande est de protection CCP

.3.2. Câbles électriques :

On distingue deux principaux types de réseaux d'éclairage public, à savoir: Le réseau indépendant en câbles souterrains qui est le plus recommandé, car il est sécurisé et offre un éclairage plus approprié et le réseau mixte sur poteaux et sur façade avec des câbles exposés ou partiellement



Fig. IV-2: Câblage sous-terrain et aérien pour deux installations d'éclairage public. Source : <https://www.efficacite-electrique.fr/>

exposés (réseau aérien).

Le recours à l'utilisation exclusive de l'énergie solaire (panneaux photovoltaïque) pour l'alimentation de l'éclairage public dans certaines régions à fort potentiel d'irradiation solaire permet de s'en passer du câblage électrique.

Le type, et la taille des câbles dépendent de la tension du réseau éclairage (basse tension, moyenne tension), les distances à servir, l'emplacement (sous-sol ou exposé), la protection (câbles posés dans des gaines ou câbles armés).

.3.3. Point Lumineux (Lampadaire)

Le point Lumineux constitue l'une des parties les plus importantes et les plus sensibles du réseau d'éclairage public. En effet, c'est la partie qui porte la source lumineuse et qui est la plus exposée aux pannes et aux aléas. Elle nécessite une attention particulière, tant au niveau conception qu'au niveau maintenance. Un point lumineux est composé essentiellement d'un luminaire, d'une crosse et d'un mât avec une boîte de jonction. Les lampadaires solaires complets abritent également le module PV, la batterie et le régulateur avec détecteur crépusculaire avec possibilité d'être munis de

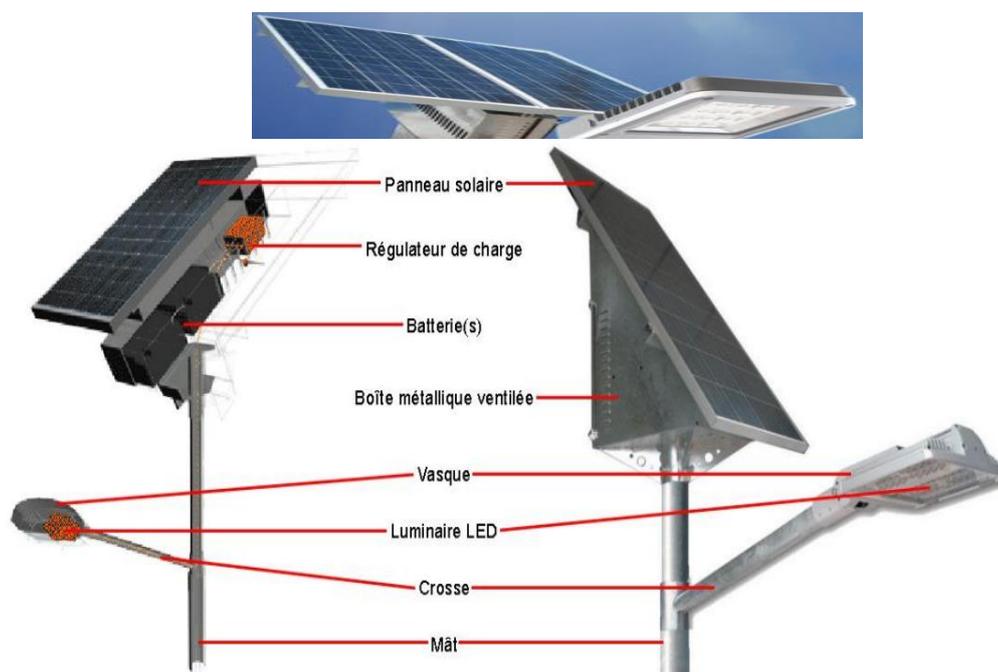


Fig. : IV-4 : Les composants d'un luminaire solaire isolé
Source : <http://www.lampadairesolaireled.com/>

détecteur de présence et de composants électroniques de gradation. Dans ce cas le lampadaire est baptisé commercialement « le All in One »

Le lampadaire est constitué des éléments suivants :

.3.4. Mât ou support :

Élément supportant le luminaire, parfois accompagné d'une crosse. Il peut être droit ou incliné. Idéalement, le mât est fixé sur la semelle en béton portant retenant les vis de fixation à travers une platine métallique pour faciliter son remplacement, si nécessaire.

Selon la fonction, l'aspect esthétique, l'espace et l'environnement, on peut identifier plusieurs types de supports, par exemple un poteau en acier, en aluminium, en fonte, en béton, en bois et de forme tubulaire...

La hauteur du support varie selon l'espace à éclairer et les exigences des normes d'éclairage public (exemple la norme européenne éclairage public EN 13 201 ou la norme française NF C 17.200). Sur les autoroutes par exemple et pour plusieurs raisons la hauteur du support pourrait être entre 08 et 12 mètres).

Les principales règles d'implantation des supports d'éclairage public sont mentionnées dans les recommandations de l'AFE [108]. Pour l'éclairage des voies publiques, on distingue :

- Implantation unilatérale ;
- Implantation bilatérale en quinconce ;
- Implantation bilatérale en vis-à-vis ;
- Implantation sur terre-plein central en rétro-bilatérale.

.3.5. Crosse

Élément le plus souvent métallique permettant de déporter la lanterne. Souvent, la crosse est fixée au mât (poteau) à travers des colliers ajustables en hauteur.

Elle a également pour rôle de donner l'angle d'orientation de la lanterne vers la voie (l'espace) à éclairer.

.3.6. Lanterne

Élément appelé également appareil d'éclairage, il est composé d'une enveloppe regroupant :

- Vasque : Élément permettant de protéger la lampe et le réflecteur de l'environnement extérieur, il est en verre ou en matière plastique et diffuse la lumière émise par la source.
- Optique ou réflecteur : Élément mettant en forme et orientant la lumière émise par les sources, de manière à adapter l'éclairage à la voie tout en limitant les nuisances lumineuses.
- Le luminaire : qui est un appareil servant à répartir, filtrer ou transformer la lumière d'une ou de plusieurs lampes et comprenant, à l'exclusion des lampes elles-mêmes, toutes les

pièces nécessaires pour fixer et protéger les lampes et, éventuellement, les circuits auxiliaires ainsi que les dispositifs de connexion au circuit d'alimentation.

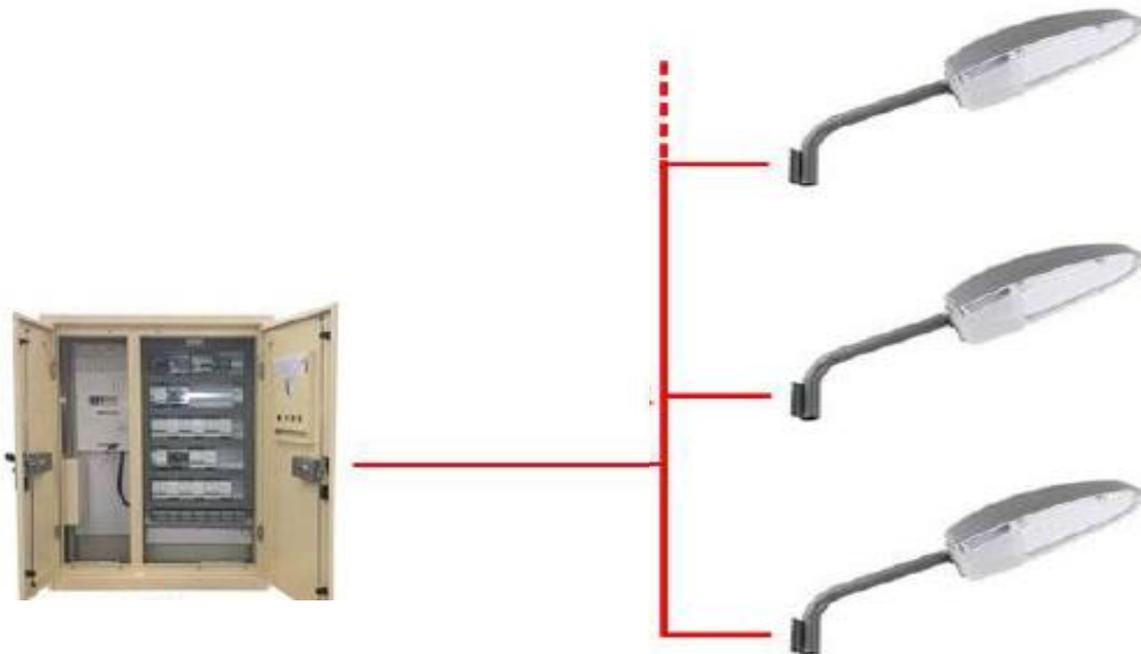


Fig. IV-5 : schéma général simplifié du réseau d'éclairage public routier

.3.7. Lampe ou source lumineuse

Élément produisant la lumière, les grandes familles étant les lampes à décharge (ballons fluorescents, sodium haute pression, iodures métalliques, ...), les lampes à filament (halogènes, incandescentes) et les semi-conducteurs (module LED).

Deux types de lampes sont favorables pour les réseaux d'éclairage public, grâce à leur puissance, leur faible consommation d'électricité, leur efficacité (qualité de la lumière émise) et leur longévité : Les lampes sodium haute pression (SHP) et les LED.

La technologie du LED a pu, progressivement, offrir plusieurs caractéristiques avantageuses et présente avec les avancés technologiques, de plus en plus, un grand intérêt pour l'éclairage public. A ce titre, les caractéristiques qui justifient le choix des lampes sont principalement le flux lumineux, l'efficacité lumineuse, la durée de vie, la couleur apparente, le rendu des couleurs et les conditions d'allumage.

Le tableau IV-1, ci-dessous, présente, à titre comparatif, quelques caractéristiques pour les différents types de lampes classiques (à l'exception de la lampe LED) [109]. Il ressort que la lampe à décharge sodium haute pression - SHP possède une meilleure efficacité lumineuse et une longue durée de vie. Ces spécificités lui ont conféré, depuis sa découverte, l'avantage d'être l'une des technologies les plus utilisées en éclairage public. **Ceci est l'une des raisons ayant favorisé le choix retenu par notre ACV comparative à ce type de moyen d'éclairage public. Autrement dit la comparaison par la méthode ACV entre un dispositif conventionnel efficace basé sur l'utilisation de la lampe sodium haute pression (SHP) et un dispositif de substitution basé sur l'utilisation de luminaire à LED à l'effet d'en déduire celui qui possèdera la charge environnementale optimale.**

Tab. IV-1 : Données caractéristiques de différents types de lampes classiques						
Type de lampe	Incandescence classique	Lampe Fluorescente	Lampe a haute pression à vapeur mercure	Iodure métallique	Sodium basse pression	Sodium haute pression
Efficacité lumineuse (lm/W)	12-15	80 - 95	40 - 60	95	jusqu'à 190	Jusqu'à 120
Indice de Rendu de Couleur - IRC	100	80 - 95	50	65 - 95	0	15 - 85
Durée de vie (h)	1200	12000	10000	4000-12000	8000	15000 - 20000
Amorçage (V)	-	400	220	3 - 10 K	400 - 600	2,8 - 4,5 K
Durée montée en régime (mn)	-	<3	5 - 8	10	20	10
<p>1 Sodium basse pression : La pression dans le tube est située entre quelques millièmes et quelques centièmes de la pression atmosphérique.</p> <p>2 Sodium haute pression : La pression dans le tube (souvent appelé « brûleur ») est de l'ordre de la pression atmosphérique (dans certains cas elle peut atteindre la valeur de 10-15 bar).</p>						

.3.7.1. Lampe Sodium Haute Pression SHP

La lampe Sodium à Haute Pression (SHP), qui avec la lampe à LED font l'objet de notre ACV comparative, a été à l'origine développée par William LOUDEN et Kurt SCHMIDT (General Electric), la lampe à vapeur de sodium haute pression a été introduite en 1965 [110]. Ces lampes de forme tubulaire et/ovulaire sont généralement de plus petites dimensions (Fig. IV-6). Elle contient une enceinte translucide et étanche appelé brûleur comportant deux électrodes formées de tungstène

souvent dopées à l'oxyde de thorium pour faciliter l'amorçage. Chaque électrode est alternativement cathode (qui émet les électrons) et anode (qui les collecte) [111].

Le tube à décharge formé d'Alumine Poly-cristalline (PCA) contient de la vapeur de sodium en excès à une pression de l'ordre de 200 kPa et de la vapeur « sèche » de mercure à une pression pouvant aller à 3 MPa. Il contient également d'autres gaz de remplissage (habituellement du Xénon) au travers lesquels la décharge peut s'établir avant que le mercure ou le sodium ne se vaporise. En effet, la réalisation de la lampe SHP était possible après l'invention d'une Alumine poly-cristalline translucide (dopé de niobium) résistant à la vapeur de sodium [110]. Le tube à décharge est contenu dans une enveloppe tubulaire claire (à deux culots) ou ovoïde diffusante (à un culot) à vide afin d'assurer l'isolation thermique en plus de la protection mécanique du tube à décharge.



Fig. IV-6 : lampes à décharge vapeur de sodium SHP
<https://www.ledwatcher.com/high-intensity-discharge-lamps-explained/>

Lorsqu'une tension convenable, principalement quelques KV, est appliquée entre les électrodes, un arc s'établit. Le dégagement de chaleur vaporise alors progressivement le mercure ensuite le sodium. En régime permanent, la décharge et la production de lumière se concentrent dans l'axe du tube, laissant une zone sombre à proximité des parois, ce qui traduit un fort gradient de température entre l'axe du tube à décharge (4000-4500 K) et ses parois (de l'ordre de 1500 K pour l'alumine).

Contrairement aux lampes à incandescence, les lampes à décharge ne peuvent pas être directement raccordées sur le réseau. La décharge doit être stabilisée par un ballast et dans certains cas amorcée par une impulsion de tension élevée produite au moyen d'un dispositif d'amorçage (Amorceur).

Les lampes à décharge doivent avoir des caractéristiques adaptées aux exigences des diverses utilisations. A ce titre, les caractéristiques qui justifient le choix des lampes sont principalement le flux lumineux, l'efficacité lumineuse, la durée de vie, la couleur apparente, le rendu des couleurs et les conditions d'allumage. La lampe SHP émet principalement un rayonnement jaune-rosé dû au doublet jaune du sodium qui est ensuite élargi grâce aux collisions (effet de pression) et qui couvre ainsi une grande partie du spectre visible.

.3.7.2. LED bleue, phosphore et synthèse de la lumière blanche

Les premières LED blanches furent produites en 1995 en recouvrant une puce à base de nitrure de Gallium et d'Indium (ou InGaN = Indium Gallium Nitride) émettant une lumière bleue, par une mince couche de phosphore jaune (Figure IV-7 gauche). Dans cette configuration, la lumière bleue à courte longueur d'onde (440 à 475 nm) émise par la LED, est en partie absorbée au niveau de la couche de phosphore jaune et réémise sous forme de lumière jaune à large spectre. Au final, cette dernière se mélange à celle bleue restante pour donner une lumière blanche (Figure IV-7 droite), dont diverses propriétés spectrales, telles que la température de couleur et l'indice de rendu des couleurs (CRI), sont déterminées par la nature du revêtement de phosphore, qui devient ainsi un

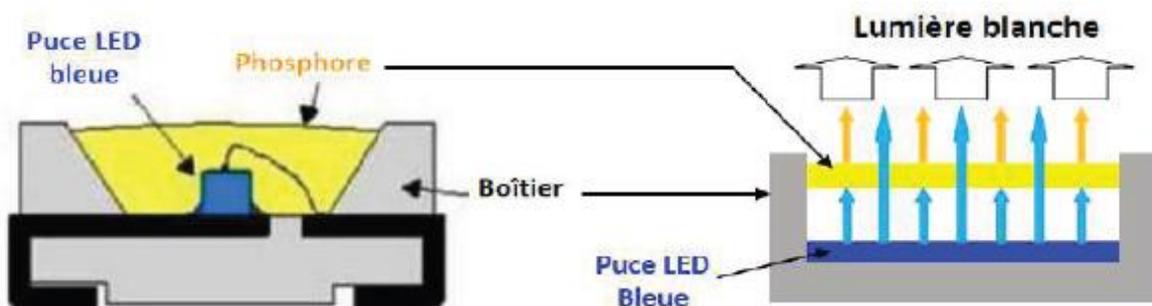


Fig. IV-7 : Structure de base de l'association LED bleue-phosphore et émission de lumière blanche [112]

élément fonctionnel de grande importance (Fig. IV-8) [112].

.3.7.3. LED COB (Chip On Board)

Dans le but de répondre aux besoins toujours croissants en sources lumineuses de qualité, à forte densité de puissance et à encombrement réduit, la technologie Chip-On-Board (COB) [113]

constitue un développement majeur pour répondre à cette quête, guidée également par le souci d'efficacité énergétique, devenu universelle face aux crises d'énergie récurrentes que connaît le monde. Ainsi, en reprenant pratiquement le même principe de mise en boîtier de la LED blanche en associant puce bleue et phosphore (Figure IV-7).

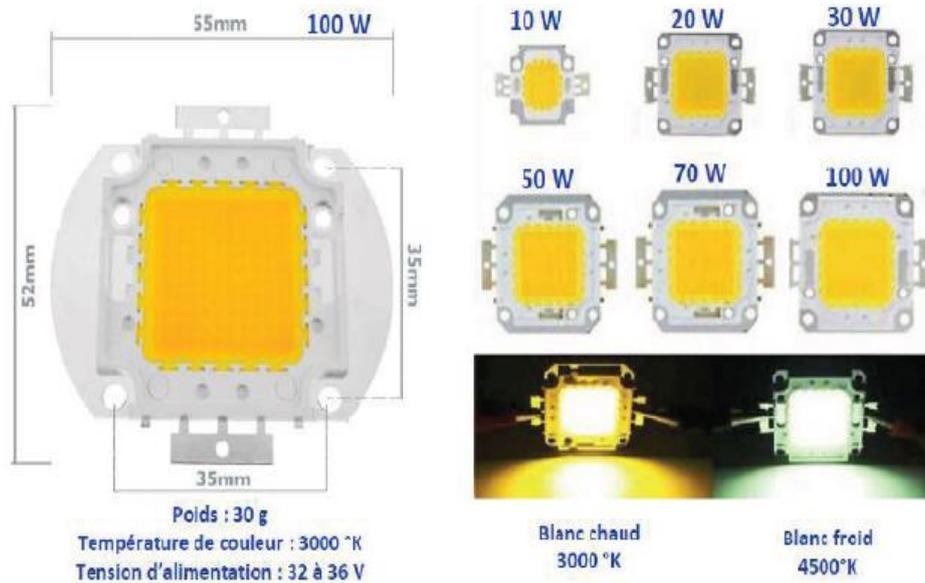


Fig. IV-8 : Modèles de LED COB et quelques données [111]

L'objectif de la technologie COB était de gagner sur les espaces que le déploiement des LED SMD (Surface Mounted Device : Appareil monté en surface) avec leur packaging individualisé nécessitait, en les associant pour mutualiser leurs émissions lumineuses en un seul faisceau d'intensité suffisante pour une application donnée d'éclairage (tels les lampadaires à modules LED pour éclairage public). De ce fait, un grand nombre de puces LED nues (sans boîtier), qui peut aller de quelques-unes à plusieurs centaines, sont d'abord assemblées les unes aux autres et disposées de manière appropriée sur une même surface de substrat, avant de les couvrir de phosphore jaune et emballer le tout dans un même boîtier (Figure IV-8). Les LED COB ainsi obtenues, reconnaissables à travers leur pastille de couleur jaunâtre très visible (dans les luminaires d'éclairage public à modules LED par exemple), présentent alors des puissances unitaires importantes, allant à 100 à 200 W pour les plus courantes actuellement alors que des modèles de 600 W sont déjà commercialisés.

Il convient de souligner les remarques suivantes :

- Le substrat en aluminium servant de base au packaging des LED COB et sert également de refroidissement primaire, qui doit être renforcé par un dissipateur thermique additionnel, en

cas de fonctionnement à une puissance supérieure à celle nominale, spécifiée notamment par le fabricant comme étant maximale.

- Les spécifications annoncées pour une LED COB en termes de flux lumineux (en lumen), puissance nominale (en watt) et efficacité lumineuse (en lumen/Watt), peuvent beaucoup varier d'un fabricant à l'autre et montrer une dispersion notable même entre lots différents du même fabricant.
- Pour répondre à certains besoins spécifiques, notamment en matière de gain d'efficacité du système et de l'optique provenant de sources à surface d'émission de lumière ou LES (Light Emitting Surface) circulaire, de nombreux modèles de LED COB à surface utile ronde, sont également disponibles, dont ceux de qualité sont très demandées, notamment par les professionnels.

.4. Comparaison entre les sources lumineuses (lampes/LEDs) :

Pour pouvoir établir une équivalence, opter pour un remplacement ou faire une comparaison entre deux types de lampes de technologies différentes, il faut recourir à des guides et des références bibliographiques fournissant des tableaux de rapprochement en fonction des critères photométriques tel que le rendement lumineux en lumen/wat et le rendu des couleurs.

Les tableaux, ci-dessous, permettent de faire le parallèle entre des sources lumineuses appartenant à des technologies différentes.

Tab. IV-2 : Rendement en W/h des divers types de sources lumineuses d'après : https://www.ecologiehumaine.eu/a-propos-des-lampes-a-led/			
	Efficacité en Lumen par Watt	rendu des couleurs	remarque
incandescence classique	10 à 13	bon	interdite en UE
incandescence halogène	15 à 25	bon	interdite en UE en 2018
fluo (tube ou compact)	40 à 90	bon	
LED	jusqu'à 140	bon	en constant progrès
Iodure métallique	70 à 100	correct	délai à l'allumage
Sodium HP	70 à 140	moyen	
Sodium BP	100 à 180	mauvais	lumière orange typique des lampadaires

Il ressort de cette comparaison que les sources lumineuses à base de LED et celles en sodium haute pression fournissent les meilleures valeurs en efficacité lumineuse par Wat consommé et également en indice de rendu des couleurs.

Il convient de souligner et à titre d'exemple que l'état du parc d'éclairage public au niveau de la wilaya d'Alger est composé de 244300 luminaires se caractérise par un basculement progressif vers les sources lumineuses à base de LED (90500 LED) représentant (37.05%), quant aux luminaires équipés de lampes SHP sont au nombre de 86100 (35.24%) et le reste 67700 luminaires (27.71%) équipés de lampes à Iodures métalliques. La situation du parc d'éclairage public au niveau nationale est illustrée par le tableau IV-3.

Tab. IV-3 : Parc d'éclairage public et points lumineux en Algérie (2018) [111]

Nombre de points lumineux existant dans le parc d'éclairage public	3 134 824		
	Mercure	1 122 589	36 %
	Sodium	1 940 045	62 %
	LED	59 145	2 %
	Photovoltaïque	13 045	0,42 %

Tab. IV-4 : Lampes HPS standards utilisées en Algérie et LED de dernière génération équivalentes - année 2021 (Selon l'Etablissement de Réalisation et de Maintenance de l'Eclairage public d'Alger (ERMA)).

Puissance des lampes HPS à remplacer (W)	70	150	250	400
Lampes à LED équivalentes (W)	30 à 50	70 à 90	110 à 130	150 à 170

Les luminaires LED équivalents du tableau IV-4 doivent-être de haute qualité pour pouvoir assurer la même efficacité lumineuse (pour des LED de qualité ordinaire, une lampe SHP de 250 est remplacée par un LED de 200 w ou au mieux avec un LED de 150 w – Cf. Tab IV-4 bis pour les équivalences en efficacité lumineuse)

Le remplacement de lampes à iodures métalliques ou celles au sodium haute pression par des modules à LED requiert la connaissance et le respect de la puissance équivalente telle qu'illustrer sur le tableau, ci-dessous.

Tab. IV- 4 bis : Données servant d'établissement de l'équivalence au plan de l'efficacité lumineuse entre lampes SHP, IOM.C et LED utilisées éclairage public.

Luminaire	Puissance (W)	Flux lumineux (Lumens)	Hauteur candélabre (m)
Sodium Haute Pression (SHP)	70	5600	3 ÷ 5
	150	14500	6 ÷ 8
	250	23000	8 ÷ 12
	400	43000	≥ 14
Iodures Métalliques (IOM.C)	70	5200	3 ÷ 5
	150	12000	6 ÷ 8
	250	18000	8 ÷ 12
	400	32500	≥ 14
Diodes électroluminescentes (LED)	50	6000	3 ÷ 5
	100	12500	6 ÷ 8
	150	18000	8 ÷ 10
	200	24000	11 ÷ 12
	250	30000	≥ 12

.4.1. Ballast

Les lampes à décharge (SHP par exemple) nécessitent un ballast pour transformer le courant alternatif en courant continu. Il est conseillé d'utiliser des ballasts électroniques de faible consommation et d'une longue durée de vie. Les lampes à LED nécessitent à leur tour un Driver. Pour l'intérêt de notre étude, des informations et explications pertinentes relatives à ces composés électroniques (des Ballast et des Driver) sont fournies, ci-dessous.

.4.2. Ballast électronique

La technologie utilisée dans la fabrication des ballasts électroniques a considérablement évolué au cours de ces dernières années reproduisant, avec beaucoup d'améliorations, l'ensemble des fonctionnalités nécessaires à la conduite de l'allumage des lampes à décharge. Ces dites fonctionnalités étaient partagées entre trois composants distincts (ballast ferromagnétique, amorceur et condensateur), ont toutes été intégrées sur un même circuit, appelé ballast électronique [110]. Mieux encore, celui-ci présente en plus un certain nombre d'atouts supplémentaires, dont une meilleure efficacité énergétique qui se traduit par une diminution notable de la puissance réactive soutirée au réseau, d'où un facteur de puissance proche de l'unité ($\cos\phi \approx 1$) ainsi qu'une durée de vie des lampes rallongées.

Les manifestations gênantes tels que le bourdonnement typique du ballast ferromagnétique ainsi que le papillotement éventuel de l'éclairage qui induisaient respectivement une fatigue sonore et visuelle, ont été, également, fortement atténués à travers une alimentation des lampes sous hautes fréquences (de 20 à 60 KHz), dont la génération est aisée grâce aux convertisseurs électroniques (Figure IV-9).

Le ballast électronique destiné à l'alimentation des lampes à décharge, réalise une première conversion de la tension caractéristique du réseau AC (230V, 50Hz) en une tension continue à l'aide d'un étage redresseur avant de passer à une tension HF (Haute Fréquence), grâce à un onduleur (Figure IV-9). Cette configuration est généralement destinée aux lampes au sodium (HPS) auxquelles elle assure un temps très réduit avant d'atteindre le régime d'éclairage nominal.

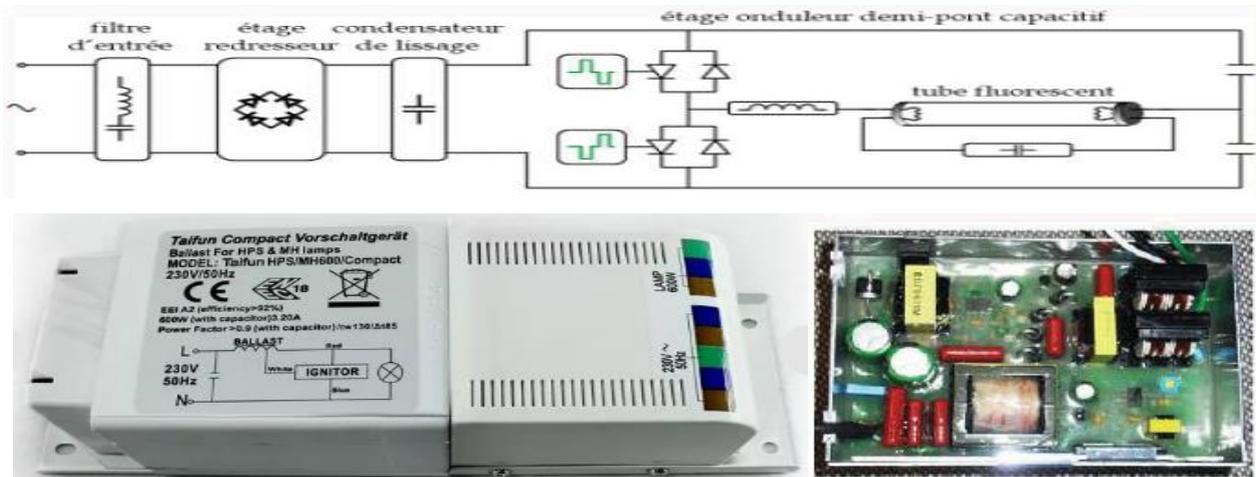


Fig. IV-9 : Modèle de ballast électronique destinés aux lampes 250W HPS

4.3. Driver de LED à courant constant

Les LED étant généralement utilisées en grand nombre selon la puissance de la source lumineuse recherchée, notamment celle destinée à l'éclairage public dont le flux lumineux de l'ordre de 10000 Lumen et plus. Une telle source lumineuse pourrait exiger la mutualisation de plusieurs dizaines à quelques centaines de cellules LED, dont l'uniformité de la lumière individuellement émise devient manifestement un critère important de qualité. La solution courante dans ce cas, serait de monter toutes les LED en série, auquel cas elles seraient forcément traversées par le même courant. Le driver le mieux adapté aurait alors pour rôle d'assurer une alimentation à courant constant [114], réglé à la valeur nominale spécifiée par le fabricant de la « lampe » LED en fonction de sa puissance, puis veiller à son maintien à travers une régulation adéquate. Ceci étant pour contrer toute sorte de dérives des paramètres du circuit, telles que celles inhérentes aux variations de température (résistance et tension des LED à l'état passant...), afin de conserver les performances

d'éclairage telles qu'elles aient été initialement prescrites. Pour cela, le driver a besoin d'une plage de variation de la tension, dont la limite supérieure augmente de manière incrémentale avec le nombre de LED mises en séries dont la chute de tension directe UD est additive et a généralement une valeur moyenne pour chacune autour de 3 v. De ce fait, en plus de la valeur fixe du courant qu'il peut assurer, un driver à courant constant pour lampe LED, est également identifié à travers la plage de tension de sortie en fonction de sa puissance et pour laquelle le maintien du courant délivré constant est garanti (Figure IV-10).



Fig. IV-10 : Driver à courant constant (1500 mA) pour lampe LED de 60 W

.5. Les impacts environnementaux des systèmes d'éclairage public:

A travers une recherche bibliographique, les impacts environnementaux des systèmes d'éclairage public qui méritent d'être mis en évidence ont pu être cernés et relatés, ci-dessous.

Les impacts environnementaux en question se situent en phase d'exploitation ainsi qu'en amont et en aval de l'exploitation des systèmes d'éclairage public.

.5.1. Les impacts en amont :

Ils sont liés à la production, au transport et à la distribution de l'électricité spécialement pour sa quantité destinée à alimenter les installations d'éclairage public, l'empreinte carbone et l'empreinte métal se situent en tête des impacts.

.5.1.1. Empreinte carbone :

la figure IV-11 illustre la quantité en équivalent gramme de dioxyde de carbone émise dans l'atmosphère pour chaque kWh d'électricité produit selon les différents processus de génération de l'électricité (Construction, transport, démantèlement et exploitation). La moyenne pour l'Europe est de 0,45 kg CO₂ eq./ kWh él.

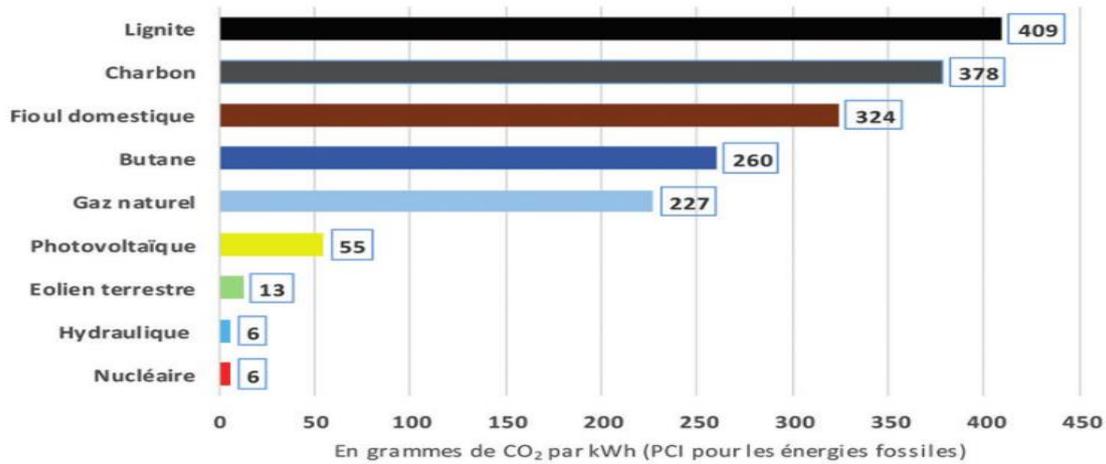


Fig. IV-11 : Quantité en g de CO₂ émise pour chaque kWh produit selon différents processus de génération de l'électricité
 Source : Base carbone ADEME, 2019

.5.1.2. Empreinte métal (épuisement des ressources):

la figure IV-12 illustre la quantité en kilogramme de métal extraite pour chaque kWh d'électricité produit selon les différents processus de génération de l'électricité (Construction, transport, démantèlement et exploitation).

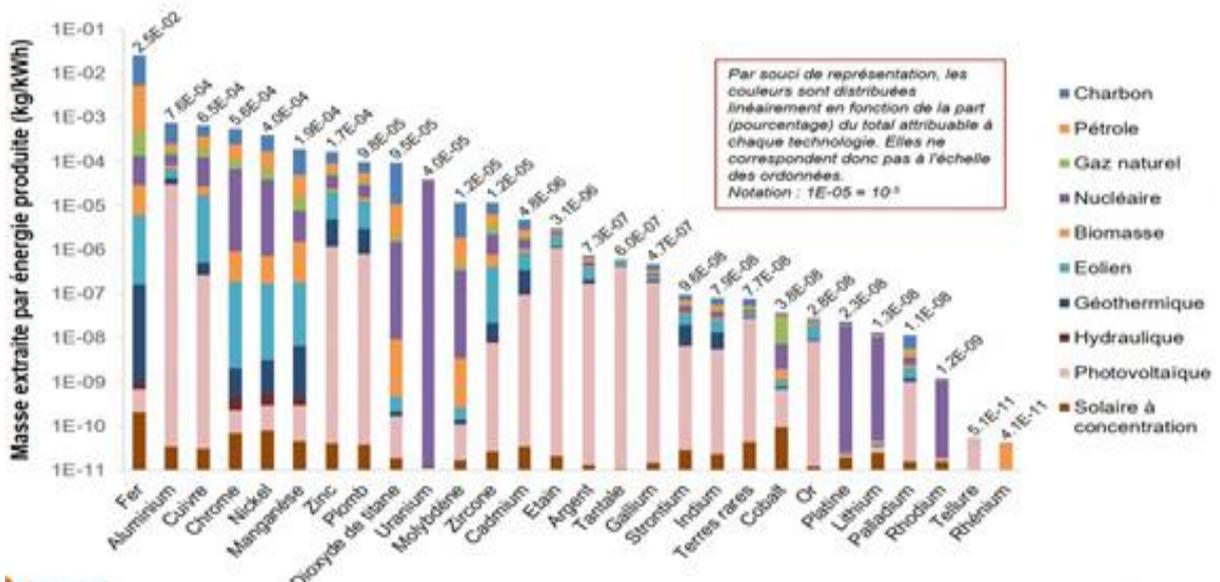


Fig. IV-12 : Quantité en kilogramme de métal extraite pour chaque kWh d'électricité produit selon les différents processus de génération de l'électricité
 Source : Ecoinvent 3.5 (méthode APOS)

.5.2. Les impacts environnementaux pendant l’implantation, l’exploitation et la maintenance

Ils sont liés à:

- La production des équipements;
- L’implantation de l’installation;
- L’utilisation;
- La maintenance.

Les impacts environnementaux de ces phases sont multiples dont les plus connus, sont les émissions de CO₂, les impacts faunistiques, floristiques ainsi que sur la santé humaine:

.5.2.1. Les émissions de CO₂ :

Ces émissions proviennent potentiellement de la fabrication et la livraison des produits et composants du système d’éclairage public, de la consommation de l’énergie électrique, de la réalisation de l’installation et de sa maintenance.

Le tableau IV-5 fait ressortir l’empreinte carbone d’un luminaire d’éclairage public tout au long de sa durée de vie estimée 20 ans.

Tab. IV-5 : Taux et quantité moyenne de CO ₂ émise en Kg par un luminaire d’éclairage public durant les phases du cycle de vie d’éclairage public pour une durée de vie de 20 ans		
Phase du cycle de vie d’éclairage public	Quantité de CO ₂ émise	Taux
Fabrication	40Kg	8%
Pose et dépose	5 kg	3%
Maintenance	20 Kg	4%
Consommation d’énergie nécessaire à la production de la lumière	420 kg	85%
Total	485 Kg	100%
Source : ADEME (<i>Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie - France</i>)		

Par ailleurs, la lumière artificielle prolongée durant toute la nuit provoque des effets négatifs sur la faune, la flore et la santé humaine, ses impacts sur la biodiversité sont divers et variés et ce du fait que 30% des vertébrés et 60% des invertébrés vivent partiellement ou totalement durant la nuit et sur tous les milieux écologiques, à savoir : terrestres, marins et d’eaux douces.

.5.2.2. Impacts sur la faune

Les études relatent que :

- Les espèces les plus visiblement touchées sont les oiseaux migrateurs nocturnes qui, se servent des étoiles lors de leur migration et sont désorientés par les sources lumineuses artificielles orientées vers le ciel en créant un halo empêchant la visibilité du ciel étoilé. Ils sont également attirés par les sources lumineuses et on compte, dans le monde, des dizaines de millions d'oiseaux qui meurent chaque année en s'écrasant contre des bâtiments éclairés ou en s'épuisant en tournant autour des zones éclairées [115] ;
- Les déplacements dans le noir total exposeraient visuellement moins les proies à leurs prédateurs, et que dans le noir total, les prédateurs nocturnes sont également moins exposés à leurs super-prédateurs, cet équilibre pourrait être atteint par l'éclairage de sites naturels (champs, forêts...) au voisinage des cités et des routes;
- D'autres espèces sont menacées par la fragmentation, par les réseaux d'éclairage et les routes, de leur habitat ou de leurs corridors faunistiques biologiques qui sont aussi des sites de reproduction, de nourrissage, de repos [116]...
- Certaines espèces (oiseaux marins, jeunes tortues marines...) qui se dirigent, en migrant ou en recherchant leur nourriture, grâce à la lumière naturelle de la nuit (ciel étoilé, réverbération de la mer...) sont donc désorientées et repoussées par la lumière artificielle engendrant ainsi leur disparition de leurs milieux habituels [117];
- D'autres espèces telles que les chauves-souris, les rongeurs..., fuyant l'éblouissement ou assimilant la mise en lumière comme un facteur de danger face à la prédation par d'autres animaux, s'empêchent à sortir pour trouver de la nourriture ainsi, une route éclairée toute la nuit pourrait constituer une barrière imperméable et bloquante à certaines espèces et aux amphibiens en migration ;
- L'atteinte du rythme circadien et le cycle du sommeil-réveil de certains animaux diurnes par l'intensité de l'éclairage artificiel aura des impacts négatifs sur l'évolution et l'équilibre de plusieurs espèces;
- La plupart des animaux nocturnes ou partiellement nocturnes sont perturbés par l'éclairage artificiel, au point de disparaître de leur habitat quand il est fortement et continuellement éclairé ;
- Plusieurs espèces d'insectes faisant partie de l'écosystème subissent également les effets de « la pollution lumineuse ». Leur disparition pourrait déséquilibrer la chaîne alimentaire, que ce soit au niveau des plantes (les insectes jouent un rôle important dans la fécondation des fleurs) ou au niveau des autres animaux (les insectes constituent la base alimentaire de

nombreuses espèces). Cette perturbation des écosystèmes impactera considérablement la biodiversité.

.5.2.3. Impacts sur la flore

Les effets connus sont:

- Des effets directs : la lumière artificielle affecte le rythme biologique des végétaux, par exemple, il a été constaté que des arbres en villes ouvrent leurs bourgeons plus précocement ;
- Des effets indirects : les impacts de l'éclairage artificiel sur les espèces pollinisatrices, en particulier les insectes nocturnes, perturbent la reproduction diminuant ainsi les services écosystémiques.

.5.2.4. Impacts sur la santé humaine

Les chrono-biologistes ont montré que la lumière artificielle subie après le coucher du soleil peut provoquer des dysfonctionnements internes, tels.

- L'inhibition de la glande pinéale responsable de la sécrétion de la mélatonine, retardant ainsi l'endormissement et le sommeil réparateur et causant l'épuisement...
- La perturbation du rythme nyctéméral de l'homme, né de l'alternance naturelle entre le jour et la nuit [118] .

La perturbation de la sécrétion de la mélatonine qui est une hormone fondamentale à presque tous les organismes animaux, aurait aussi des effets sur:

- La reproduction, la fabrication des spermatozoïdes chez l'homme;
- La perturbation du cycle menstruel de la femme.

La mélatonine détiendrait également des propriétés anticancéreuses, sa suppression par la lumière artificielle est probablement la cause d'une augmentation très importante du taux de cancer du sein chez les femmes travaillant la nuit.

.5.3. Les impacts environnementaux en aval :

Ils sont liés aux déchets de fin de vie tel que le démantèlement des installations, le transport, le tri, le stockage, le recyclage et la valorisation des divers composants du réseau d'éclairage public, à savoir : supports, câbles, luminaires, lampes, composants électroniques, verre, matières plastiques... Le recyclage ou le stockage de certains déchets en quantités croissantes imposent des contraintes techniques et financières liées à la mise en place de technologies appropriées telles qu'exposé, ci-dessous.

Plus le recours à l'usage de l'éclairage public est intensif, plus le volume des déchets produits est important et plus les impacts sur l'environnement sont graves.

Les déchets de l'éclairage public sont considérés actuellement comme des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE), présentant un sérieux problème à l'échelle d'une collectivité locale ou du territoire national, leur recyclage et/ou élimination obéit à des processus spécifiques qui sont traités plus loin dans cette étude.



Fig. IV-13 : Volume et diversité des déchets de l'éclairage public

.6. Approche méthodologique de l'étude:

L'étude de la problématique adopte la méthodologie de l'Analyse du Cycle de Vie, visant, à l'issue d'une analyse comparative des technologies existantes, à apporter des réponses et des solutions avantageuses en adéquation avec les enjeux environnementaux, énergétiques et économiques liés à l'éclairage public sans omettre que lesdites solutions devraient s'inscrire dans une démarche plus globale faisant appel à d'autres leviers d'action relevant de domaines connexes, notamment :

.6.1. Au plan de la réglementation et des normes :

Au vue des retombées citées précédemment, il est indispensable d'élaborer et de mettre en application des textes réglementaires et des normes techniques favorisant la durabilité des systèmes d'éclairage public [105] intégrant les exigences et critères ci-après:

- Intégration de la durabilité (impacts environnementaux) dans l'ensemble du cycle de vie du système d'éclairage (Conception, production des intrants, réalisation des ouvrages, exploitation, maintenance et gestion des déchets de fin de vie);
- L'optimisation de ses performance environnementale
- La prise en compte de la préservation des espèces faunistiques;
- La prise en compte de la préservation des espèces floristiques;
- La prise en compte de la préservation du bien-être et de la santé humaine;
- L'optimisation de la performance énergétique ;
- L'optimisation économique.

.6.2. Au plan de la conception :

L'adoption de composants et d'intrants des systèmes d'éclairage public éco-conçus ayant de performances énergétiques et environnementales approuvées s'avère un préalable nécessaire à un déploiement d'une approche visant la durabilité de l'éclairage public.

Il s'agit de mettre en œuvre le concept d'Eco-conception lors de la conception des intrants et de l'élaboration des plans relatifs aux systèmes et réseaux d'éclairage (Publicitaire, résidentiel, urbain, routiers et de signalisation) en visant l'optimisation de la consommation, l'évitement du gaspillage et la réduction de nuisances lumineuses et de la pollution.

Il convient de noter que le non-respect des normes en vigueur d'implantation et d'orientation des luminaires est l'une des causes du gaspillage qui pourrait dépasser la moitié de l'énergie consommée.

En sus des retombées énergétiques et économiques conséquentes, les espèces faunistiques et floristiques subissent, à cause de l'inadéquation de la conception et/ou d'une mauvaise orientation des luminaires, de graves nuisances.

Les illustrations, ci-dessous, montrent des écarts aux normes d'usage couramment constatés dans le déploiement des installations d'éclairage extérieur.

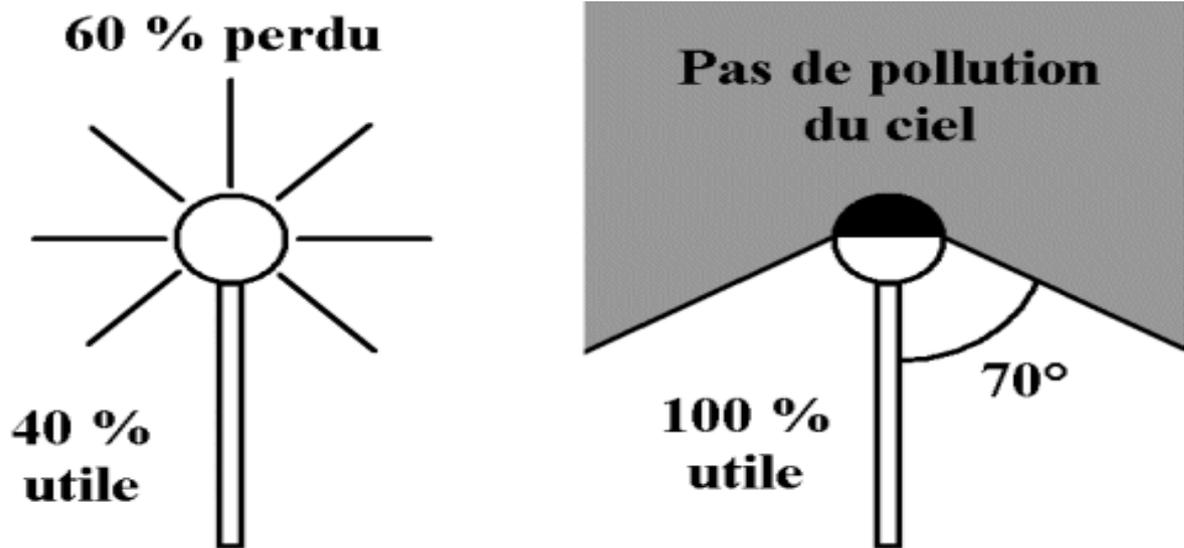


Fig. IV-14 : Influence de l'angle d'orientation du flux lumineux sur la rentabilité d'un luminaire

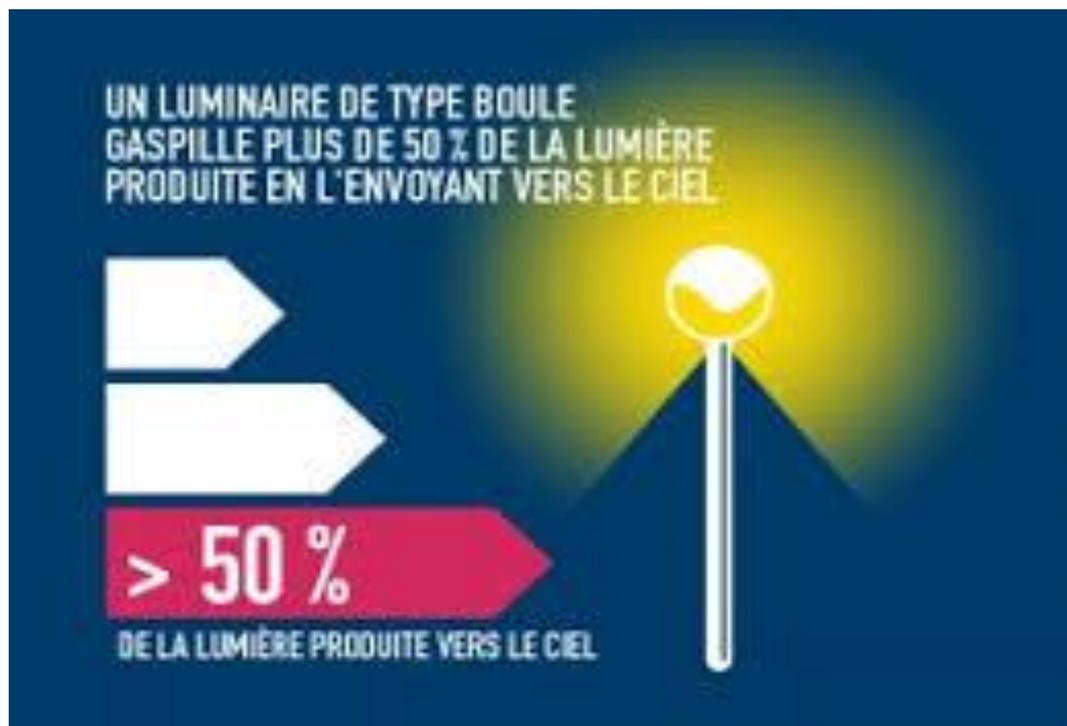


Fig. IV-15 : Une perte de plus de 50% de l'énergie consommée sur les lampadaires en boule dépourvus de réflecteurs

Pour réduire la pollution lumineuse et gagner en efficacité énergétique, le luminaire doit présenter un coefficient ULOR* :

- ✓ inférieur à 1% en éclairage routier et
- ✓ de 10 à 15% au maximum en éclairage d'ambiance [119].

Pour limiter l'ULOR, l'ampoule doit être à l'intérieur du capot, lui-même positionné le plus proche possible de l'horizontal (voir schémas). A noter que *L'ULOR (*Upward Light Output Ratio*), représente le pourcentage du flux de lumière émis par le luminaire vers le ciel.

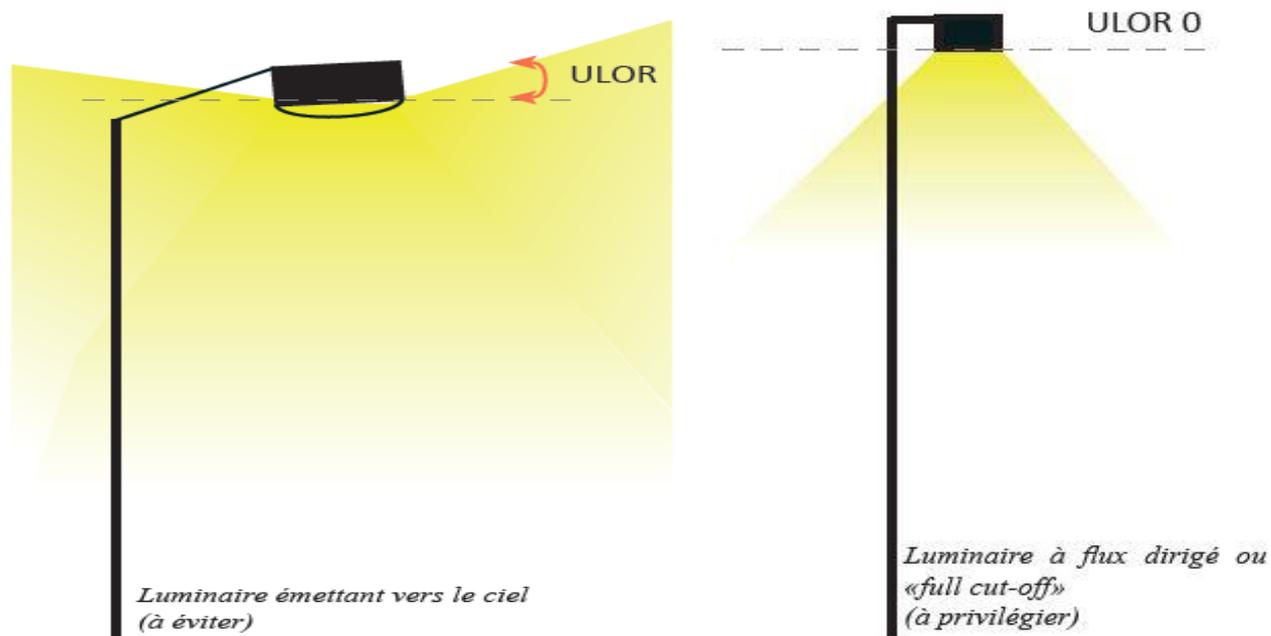


Fig. IV-16 : Angle de tolérance d'orientation d'un luminaire d'éclairage extérieur

.6.3. Au plan de l'utilisation des sources lumineuses (lampes) :

L'autre aspect de durabilité des installations d'éclairage public consiste à opter pour des lampes et des luminaires économiques et moins polluants en remplaçant les lampes énergivores à incandescences (au mercure, au sodium...) par des lampes plus respectueuses de l'environnement, économiques et à durée de vie plus longue [106].

D'après une étude de l'Association Française de l'Eclairage, les gains en consommation d'énergie qui pourraient avoir lieu, suite au remplacement de lampes à ballons fluorescents à mercure et de lampes à Sodium Haute Pression (SHP) par une nouvelle installation complète à LED munie d'un système de variation de puissance, sont respectivement de l'ordre de 79% et de 71% comme illustre le tableau IV-6.

Tab. IV-6 : pourcentages des gains en consommation d'énergie selon plusieurs scénarios d'optimisation				
Source : Association Française d'Eclairage - AFE				
Type de rénovation (A et B)	Gains en KW de puissance souscrite		Gains en KWh avec fonctionnement à puissance variable	
	1 ^{er} cas : Sans limitation du niveau obtenu	2 ^{ème} cas : Avec limitation du niveau aux valeurs normatives EN 13201-2	1 ^{er} exemple : 2 régimes de fonctionnement (50 et 100%) sur 75% du parc de luminaires	2 ^{ème} exemple : 3 régimes de fonctionnement (30, 50 et 100%) sur la totalité du parc de luminaires
A - Remplacement des luminaires à ballons fluorescents de mercure par :				
A1 : Luminaires hermétiques à lampe claire en SHP	43%	43 à 46%	49%	70%
A2 : Luminaires hermétiques à lampe claire en halogénure métallique	48%	-	55%	74%
A3 : Luminaires hermétiques à source LED	52%	-	60%	72%
A4 : Nouvelle installation complète à LED avec nouvelle implantation	58%	-	64%	79%
B - Remplacement de luminaires fermés à lampes SHP ou iodure (de performances anciennes) par :				
B1 : Luminaires hermétiques pour lampe tubulaire claire SHP	19%	23 à 27%	31%	59%
B2 : Luminaires hermétiques pour sources LED	34%	-	44%	67%
B3 : Nouvelle installation complète à LED	41%	-	50%	71%
SHP : Sodium Haute Pression				

Le tableau IV-7, illustre les données d'une expérience pilote réalisée au niveau de la ville de Douai (France) visant à améliorer l'efficacité énergétique, environnementale et économique, il s'agit de l'étude comparative de cinq (05) scénarios de remplacement pour une installation pilote existante composée de 217 points lumineux fonctionnant avec des luminaires conventionnels (à vapeur de mercure – VM) [120].

Tabl. IV-7: pourcentages des gains annuels en consommation d'énergie et économique selon cinq (05) solutions d'optimisation pour une installation classique d'éclairage public de de 217 points lumineux (lampes en vapeur de mercure -VM)

	P. installée [kW]		Énergie active [kWh]		Facture K cst* [€ TTC]		Facture K + 30 % [€ TTC]
Situation existante : 217 PL - 545 lampes 125 W VM 4 500 K Fonctionnement puissance nominale 4 100 heures annuelles	74,94	Situation existante	307 244	Situation existante	43 960,88	Facture K cst* -30 949,21 € - 70,40 %	57 149,15
	- 51,07 kW - 68,15 %		- 209 376,76 kWh - 68,15 %		- 30 949,21 € - 70,40 %		- 40 233,98 € - 70,40 %
Situation projetée 1-1 : 217 PL - 217 lampes 100 W SHP 2 000 K 4 100 heures annuelles	23,87		97 867		13 011,67		16 915,17
	0,00 kW 0,00 %		- 59 698,87 kWh - 61,00 %		- 6 187,43 € - 47,55 %		- 8 043,66 € - 47,55 %
	23,87		38 168		6 824,24		8 871,51
Situation projetée 1-2 : 217 PL - 217 lampes 100 W SHP 2 000 K Fct coupure de nuit de 23h00 à 6h00, Pn reste nuit	23,87	- 262 672 kWh - 85,46 %	36 232,12 kWh 92,31 %	- 37 293 € - 84,83 %	1 440,49 € 16,24 %	- 1 108,07 € - 16,24 %	8 871,51
	- 5,97 kW - 25,00 %						
Situation projetée 2-1 : 217 PL - 217 lampes 75 W LED 3 000 K Fonctionnement puissance nominale 4 100 heures annuelles	17,90	Projet optimisé	73 400	Solution retenue par la ville de Douai	7 932,31	Facture K + 30 % - 6 033,8 € - 30,04 %	10 312,00
	0,00 kW 0,00 %		- 28 728,14 kWh - 39,14 %		- 1 264,61 € - 15,94 %		- 1 643,99 € - 15,94 %
Situation projetée 2-2 : 217 PL - 217 lampes 75 W LED 3 000 K Fct puissance réduite de 70 % de 23h00 à 6h00, Pn reste nuit	17,90		44 672		6 667,70		8 668
	0,00 kW 0,00 %		- 16 046,01 kWh - 36,92 %		- 1 547,61 € - 23,21 %		- 2 011,89 € - 23,21 %
Situation projetée 2-3 : 217 PL - 217 lampes 75 W LED 3 000 K Fct coupure de nuit de 23h00 à 6h00, Pn reste nuit	17,90		28 626		5 120,09		6 656,11

$P. installée = (217 * 100)/(0.91 * 1000)$, 0,91 est un facteur de puissance, $Energie active = P. installée * 4100h$

Il ressort des résultats, ci-dessus, qu'entre le scénario existant et le scénario 2-2 (installation LED avec diminution de la puissance de fonctionnement à 30% de 23h00 à 06h00), les valeurs de la diminution de la consommation de l'énergie et du coût sont, respectivement, de moins de 85.46% (pour la puissance installée) et de moins de 84.83% (pour l'énergie active) ce qui permet, par conséquent, de prédire que la performance environnementale aura une tendance similaire. Ceci nécessite d'être étayé par une ACV comparative.

- **REALISATION D'UNE ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A LED**

.1. METHODE

L'étude de la problématique adopte la méthodologie de l' Analyse du Cycle de Vie conformément aux **exigences et lignes directrices édictées par** la norme ISO 14044, visant, à l'issue d'une analyse comparative des technologies existantes et celles émergentes, à apporter des réponses et des solutions avantageuses en adéquation avec les enjeux environnementaux, énergétiques et économiques liés à l'éclairage public sans omettre que lesdites solutions devraient être soutenues par des mesures préalables, portant approbation d'une réglementation et d'un dispositif normatif favorisant la durabilité des systèmes d'éclairage public [105].



Fig. IV-17 : Luminaires à LED 50W, 100W, 150W, 200W, 250W

A ce titre la présente étude vise l'examen de la pertinence environnementale du recours à l'utilisation des luminaires et sources lumineuses non conventionnels à base de LED en mettant en exergue leurs score environnementaux comparés à ceux des luminaires conventionnels tels que les

luminaires fonctionnant avec des lampes de sodium haute pression (SHP) et des luminaires fonctionnant avec des lampes aux halogénures métalliques en céramique (CMH).

.2. L'unité fonctionnelle :

l'unité fonctionnelle de référence la plus significative adoptée pour l'ACV des luminaires d'éclairage public est le tronçon de route éclairée avec un flux lumineux minimal de 20 000 Lumens sur une durée déterminée correspondant souvent à la durée de vie du luminaire (15 ans) et selon les critères de conception de l'éclairage routier [121]. Le kilomètre de route éclairée est, également, fréquemment utilisé comme unité de base pour les calculs économiques.

D'autres unités fonctionnelles pourraient être employées pour étayer la comparaison et rendre plus lisibles les résultats de l'évaluation d'impacts environnementaux.

L'unité fonctionnelle retenue pour cette étude est : l'éclairage d'un tronçon de route de trente (30) mètre pendant une durée de quinze (15) ans avec un flux lumineux de 20 000 Lumens.

La longueur du tronçon a été fixée à trente (30) mètre du fait que cette distance correspond généralement à l'écartement entre deux poteaux d'éclairage public mitoyens.

.3. Limite du système (champ de l'étude)

Les frontières du système comprennent la production des matières premières, le traitement des matériaux, l'énergie nécessaire à la fabrication et à l'utilisation, et l'élimination en fin de vie des « lampes » et des luminaires comparés.

Les systèmes étudiés incluaient les flux de matières et d'énergie pour l'acquisition des matières premières; les processus de fabrication; l'emballage et le transport des matériaux, des pièces et du produit final ; la consommation d'électricité en cours d'utilisation; et le transport en fin de vie et l'élimination des matériaux.

Il est entendu par luminaire « L'appareil servant à répartir, filtrer ou transformer la lumière d'une ou de plusieurs lampes et comprenant, à l'exclusion des lampes elles-mêmes, toutes les pièces nécessaires pour fixer et protéger les lampes et, éventuellement, les circuits auxiliaires ainsi que les dispositifs de connexion au circuit d'alimentation ».



Fig. IV-18 : Luminaires SHP 250W retenu pour l'ACV

Il s'agit, donc, de la comparaison :

- d'un 1^{er} système composé du Boitier (capot (partie supérieure) + le socle (partie inférieure)), du Ballast, du condensateur, de l'allumeur et de la lampe (SHP et CML) ; et
- d'un 2^{ème} système composé du Boitier capot (partie supérieure) + le socle (partie inférieure)), du Driver, et de la LED.

La fig. IV-19 illustre les parties comparées de chaque type de luminaire ((A) : luminaire SHP, (b) luminaire à LED).

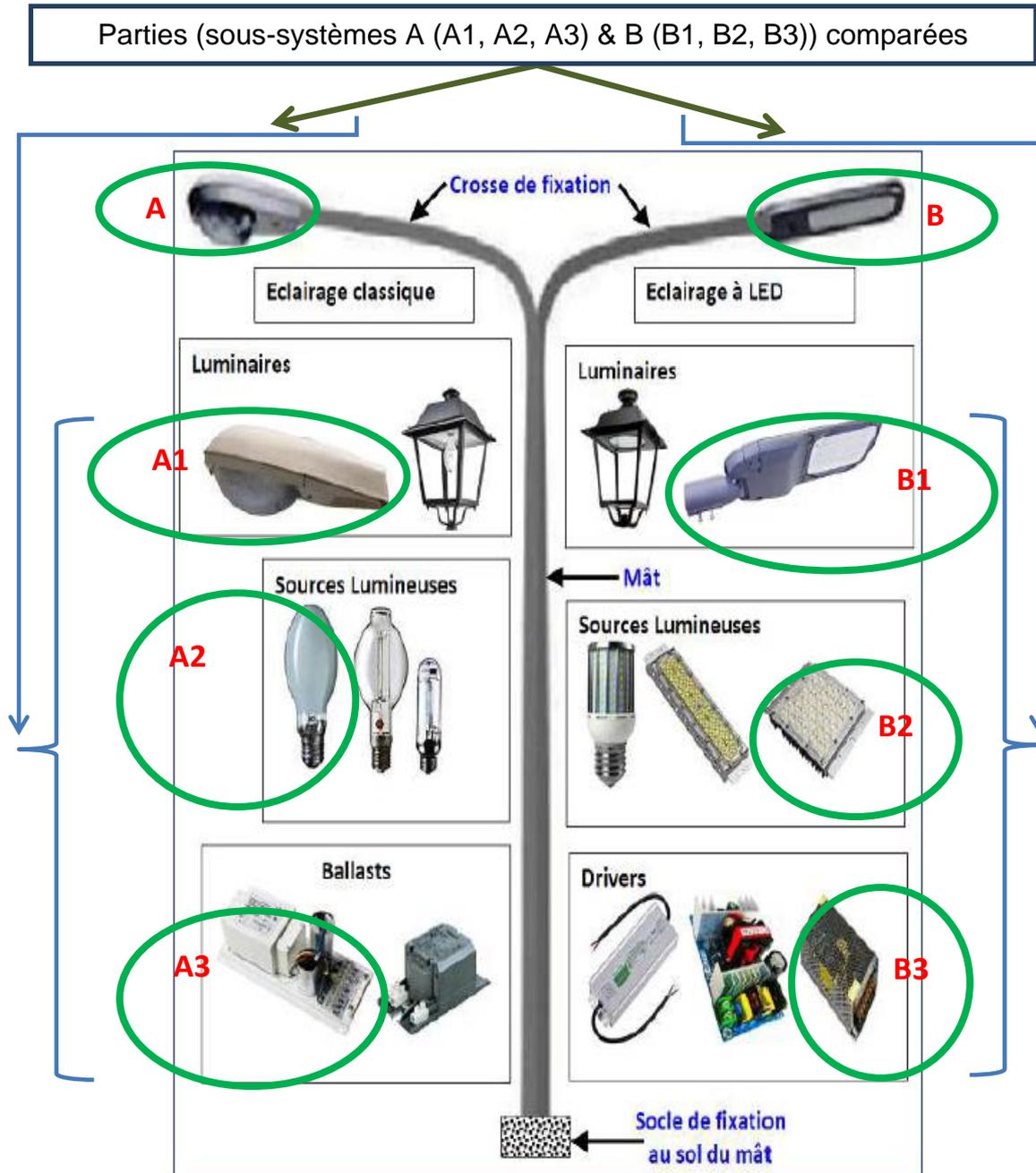


Fig. IV-19 : composants concernés par l'étude ACV comparative dans les cas de lampadaires d'éclairage public conventionnels (SHP) et à LED

Le transport de matière première à l'usine de production est inclus dans la base de données Ecoinvent, mais le transport des luminaires de la Chine vers l'Algérie devait être pris en compte. La teneur en aluminium s'est révélée approximativement la même pour les luminaires et son impact a été donc exclu du scénario de base. En outre, l'entretien des deux luminaires implique le remplacement de la lampe en fin de vie et son impact peut être estimé par rapport à l'unité fonctionnelle (60 000 heures) par la distance nécessaire à parcourir pour installer et remplacer la

lampe, 2 fois pour LED contre 3 fois pour SHP. Il s'agit d'une estimation aléatoire du fait que l'endroit et le moment précis ne sont pas connus.

L'ACV comparative, objet de cette étude, vise donc à analyser la fabrication, l'utilisation et la fin de vie (EoL) des luminaires composés d'une source lumineuse (lampe ou barrette), d'un appareillage (ballast ou driver), des accessoires et du boîtier de chaque luminaire.

La phase de fabrication comprenait l'acquisition des matières premières, les processus de fabrication des matériaux et des pièces, le transport des matériaux et des pièces et l'emballage, tant du produit intermédiaire que du produit final. L'utilisation ne représentait que la consommation d'électricité pendant le fonctionnement (entretien exclu tel que précisé dans les paragraphes ci-dessous). La modélisation de la fin de vie porte sur le transport et l'élimination des matériaux.

Les données de l'inventaire du cycle de vie (ICV) collectées sont reprises sur le tableau IV-8 pour le luminaire HPS et le luminaire LED. Le luminaire HPS avec une lampe de 250 W produit un flux lumineux de 23000 lm selon le fabricant du luminaire. Le luminaire à LED contenant 200 pièces de LED de 1 W et fournissant 24000 lm selon le fabricant du luminaire. Ceci permet d'établir l'équivalence en terme de flux lumineux entre les deux (02) luminaires retenus pour l'étude ainsi que l'aptitude des deux types de luminaires à fournir la fonction prévue par l'Unité fonctionnelle.

Parmi plusieurs luminaire démantelés, nous reprenons dans le tableau IV-8 les données de démantèlement des luminaires choisis pour la comparaison réalisée à l'occasion de cette étude.

Il s'agit de deux (02) modèles représentatifs choisis dans la gamme la plus utilisée en éclairage public en Algérie.

Ce démantèlement a permis d'avoir plus de clarté dans le rapprochement et la mise à l'échelle des données empiriques à celles puisées de la littérature scientifique.

Les données collectées après une revue de littératures élargie s'étendent aux flux des matières premières, aux processus élémentaires de production des matériaux et aux processus de transformation et de fabrication des pièces et composants nécessaires à chaque luminaire.

Les flux afférents à l'énergie de production, d'utilisation, de fin de vie et de transport sont également intégrés aux divers processus, les tableaux IV-9, reprennent les flux, ci-dessus, cités.

Tab. IV-8 : Quantification des matériaux résultant du démantèlement des luminaires comparés (SHP 250w vs LED 200 w)			
Quantification des matériaux résultant du démantèlement du luminaire : SHP 250 w			
Composant	Matériaux	Poids (g)	Taux (%)
Boitier	Aluminium	1155	15,47
Composants (accessoires)	Aluminium	343	4,59
Composants (accessoires)	Acier	108	1,45
Réflecteur	Aluminium Chromé	1061	14,21
Verre plat	Verre	628	8,41
Alumeur/amorceur	Cuivre/polymère	39	0,52
Ballast	Cuivre/Aluminium	2955	39,57
Condensateur	Cuivre/polymère	64	0,86
Douille	Polymère	146	1,96
Fils connecteurs	Cuivre	14	0,19
Raccord	Plastique	48	0,64
Vis lampe	Acier	7	0,09
Lampe	verre	169	2,26
Emballage	Carton ondulé imprimé)	700	9,37
Emballage	Nylon	30	0,40
Total		7467	100
Quantification des matériaux résultant du démantèlement du luminaire : LED 200 w NREP 43L (NOUR ECLAIRAGE)			
Boitier/Echangeur thermique (Refroidisseur)	Aluminium/acier	4100	61,77
Couvercle transformateur			
Emboitement des verres			
Vis de fixation			
Vis d'assemblage			
Fils électriques	Cuivre	26	0,39
Support/Base de LED (Porte LED)	Aluminium	98	1,84
Enveloppe de driver LED			
Circuit transformateurs/Driver LED et autres composants électroniques	Cuivre et autres matériaux en petites quantités	54 *4 = 216	3,25
Gaines	Matières plastiques	320	4,82
Enrobage du transformateur			
Joint d'étanchéité			
Verre de diffusion des LED (optique/lentille-réflecteur)	Verre	283x4= 1128	16,99
Emballage	Carton ondulé imprimé)	721	10,86
Emballage	Nylon	29	0,44
Total	/	6 638	100.00

L'utilisation a été modélisée sur la base de la consommation moyenne d'électricité en se référant au mix énergétique proche de celui de l'Algérie (Turbine à gaz 59%, Turbine à vapeur 12%, Cycle combiné 23%, Diesel 2%, Energie renouvelable 3%, Hydraulique 1% (2018)).

Dans 15 années d'utilisation, un luminaire HPS consomme 15,75 MWh (Million de Wat/heure) et un luminaire LED 12,6 MWh. (*15 ans X 4200 heures de fonctionnement X Puissance du luminaire (250 w ou 200 w)*)

Le traitement de fin de vie (EoL) comprenait le transport et l'élimination de tous les matériaux nécessaires sur la période de 30 ans, à savoir l'élimination et ou le recyclage de l'aluminium, du verre, des plastiques, des lampes fluorescentes, de l'électronique et du carton (emballages).

.4. Exclusions du champ de l'étude :

Sont exclus de la comparaison entre les deux « sous-systèmes » cités, ci-dessus, les autres équipements de base de l'installation d'éclairage public (armoires électriques, câblage, mat, crosse). Cette exclusion de l'étude comparative s'explique par le fait de la similitude entre ces éléments dans les deux types de technologie d'éclairage public (à SHP ou à LED), par conséquent les impacts sont identiques et ne nécessitent pas d'être comparés au titre de cette ACV.

Des calculs hypothétiques préliminaires ont été effectués et les impacts du voyage pour le remplacement de l'ampoule 2 et/ou 3 fois sur 15 ans se sont avérés très minimes par rapport aux autres impacts. Par conséquent, et compte tenu de l'impossible prédiction de la distance réelle au préalable, la distance à parcourir pour remplacer les ampoules à la fin de leur vie est exclue du champ de l'étude.

En référence aux données d'inventaire et des références bibliographiques, les catégories d'impacts sont calculées et modélisées par des logiciels dédiés à l'ACV tels que Open LCA et SimaPro du Groupe PréConsultants, Pays-Bas.

.5. Plage de temps :

bien que la littérature consultée prévoie pour une installation d'éclairage public une durée de vie de 20 à 30 ans, toutefois la durée de vie est souvent tributaire de plusieurs facteurs, telle que les conditions de fonctionnement (entretien, climat, caractéristiques du milieu environnant, air marin, vandalisme, contraintes imposées par les nouvelles technologies...), nous considérons qu'une durée de 15 ans correspond à une période de fonctionnement optimal d'une installation d'éclairage public. Ce délai correspond à un fonctionnement de 60 000h (15 ans x 365 jrs x 11 heures = 60225 heures arrondies à 60000 heures). Les avancées technologiques rapides conjuguées à une disponibilité des moyens financiers peut pousser le maître d'ouvrage à rénover l'installation en l'espace de quinze (15) ans au lieu de supporter les coûts d'entretien d'une ancienne installation relativement élevés..

La durée de vie de la lampe HPS (long life) est de 32 000 h selon le fabricant de la lampe. Compte tenu de leur structure robuste, les durées de vie du capot du luminaire HPS et du ballast magnétique ont été estimées très longues, s'étalant sur plus de 30 ans de fonctionnement, soit 4000 à 4200 heures par année. La lampe HPS nécessite un condensateur de compensation et un allumeur pour fonctionner correctement.

Les durées de vie de l'allumeur, du condensateur de compensation, du ballast et du driver ont été alignées à la durée de vie moyenne d'une installation et estimées à 15 ans (60 000 heures de fonctionnement).

.6. Limite géographique :

Dans notre étude, nous avons supposé que toutes les lampes et tous les luminaires étaient produits en Chine et utilisés en Algérie et que les déchets sont collectés et traités en fin de vie en Algérie. Certaines données bibliographiques ont été adoptées à l'étude en considération des similitudes géographiques.

L'étude de l'inventaire et la collecte de données pour la production, l'exploitation et la fin de vie, l'élimination ou le recyclage sont menées en tenant compte de la période actuelle (2022) ainsi que des données issues de références bibliographiques parues entre 2010 et 2022.

Les catégories d'impacts intermédiaires retenues pour la comparaison sont celles édictées par la méthode Eco-Indicator (EI-99) ainsi que la méthode CML, largement reconnues et garantissant des résultats fiables. A rappeler que des scientifiques néerlandais ont développé conjointement une approche nommée « CML+EI » qui consiste à intégrer « CML2002 » et « Ecoindicator99 ».

Certaines catégories d'impacts n'ont pas été prises en considération :

- Radiation ionisante: absence de substances radioactives dans l'inventaire;
- Utilisation des sols: impact négligeable (des usines de fabrication de luminaires SHP et leurs composants se convertissent en usine de production de luminaires LED et composants);
- Écotoxicité des eaux douces, marines, sédiments: impacts supposés minimes,

Eco-Indicator 99 fournit également les facteurs de caractérisation des dommages (Endpoints) selon trois approches [103], à savoir :

4. Effet hiérarchique;
5. Effet égalitaire ;
6. Effet individualiste.

.7. Inventaire (ICV) :

C'est l'étape de base de toute ACV. les données d'inventaire des luminaires comparés sont obtenues à partir du démantèlement de différentes unités de luminaires d'éclairage public fonctionnant par différentes sources lumineuses (LED, lampe SHP) (Cf. tableaux IV-8) et complétées, au besoin, par des sources bibliographiques, qui elles-mêmes puisent essentiellement des bases de données telle que Ecoinvent, ELCD (Cf. tableaux IV-9).

.8. Calcul du score d'impact de chaque catégorie intermédiaire :

L'équation de base (générique) servant à calculer toutes les catégories d'impact est la suivante :

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \times M_s \quad (1)$$

Avec

- SI_i = le score de caractérisation intermédiaire pour la catégorie i
- $FI_{s,i}$ = le facteur de caractérisation intermédiaire de la substance s dans la catégorie intermédiaire i
- M_s = la masse émise ou extraite de la substance s

.8.1. Normalisation :

Elle consiste à calculer l'importance relative d'un indicateur de catégorie par rapport à une valeur de référence, qui n'est pas toujours la même selon les études. Cette étape est nécessaire pour réaliser le regroupement (classification des catégories d'impact). La normalisation permet de représenter les impacts sur un même graphique.

.8.2. La pondération :

Elle consiste à convertir et à agréger les indicateurs de catégories en utilisant des facteurs numériques de pondération, qui dépendent des valeurs sociales, politiques et éthiques données aux catégories d'impact intermédiaires, afin d'obtenir un score unique par produit [86].

Le logiciel de modélisation permet la normalisation, la pondération et l'agrégation des indicateurs de catégories

Cette étude vise l'examen de la pertinence du recours à l'utilisation des luminaires et sources lumineuses non conventionnels (à base de LED) en mettant en exergue leurs scores environnementaux comparés à ceux des luminaires conventionnels tels que les luminaires fonctionnant avec des lampes de sodium haute pression (SHP) et des luminaires fonctionnant avec des lampes aux halogénures métalliques en céramique (CMH).

L'objectif est d'aboutir à des éléments de décision permettant l'adoption (ou non) de luminaires et de lampes économiques plus respectueuses de l'environnement, moins polluants et à durée de vie plus longue [106] en remplacement des lampes énergivores à incandescences, au mercure, au sodium...

9. RESULTATS :

Certaines ressources bibliographiques présentant des études d'ACV comparatives se limitant à comparer les lampes traditionnelles et les LED sans tenir compte du contexte de leur utilisation et du luminaire dans son ensemble (accessoires non inclus). Les résultats repris dans lesdites ressources sont en majorité en faveur des LED (Cf. fig IV-20 et IV-21).

9.1. Résultats d'ACV comparatives des performances environnementales des sources lumineuses:

Selon la recherche bibliographique, les performances énergétiques et environnementales des diverses technologies d'éclairage public (sources lumineuses) ont fait l'objet de plusieurs études d'ACV et d'ACV comparatives publiées à travers des articles scientifiques qui ont été exploitées à l'occasion de l'élaboration de cette étude.

Les résultats de comparaison des performances environnementales des divers types de lampes utilisées en éclairage public, montrent que les lampes LED présentent des caractéristiques plus favorables du point de vue environnemental, énergétique et économique et ce sur l'ensemble des phases du cycle de vie.

A l'issue d'études ayant mis en exergue les multiples inconvénients des luminaires à incandescence, certains pays ont recouru à leur retrait de tout usage professionnel ou résidentiel.

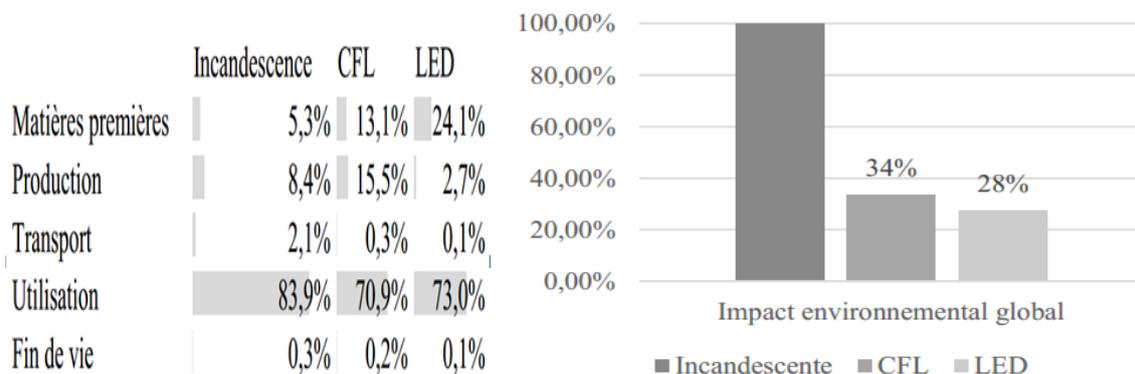


Fig. IV-20 : Répartition de l'impact environnemental global par étapes du cycle de vie, et comparaison entre les impacts environnementaux globaux des lampes : à incandescence, CFL et LED

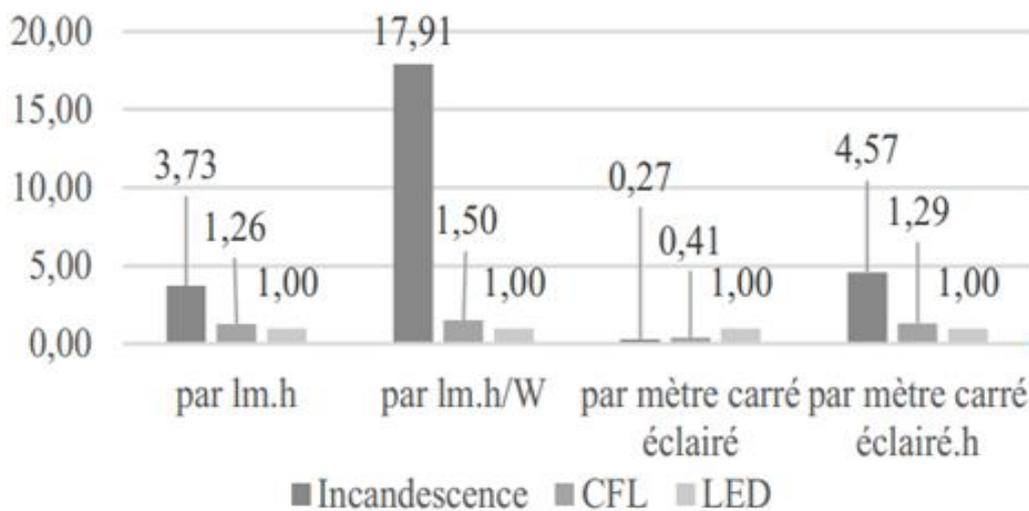


Fig. IV-21: Comparaison de l'impact environnemental global d'une lampe à incandescence, CFL et LED par lm.h/w, par mètre carré de surface éclairée pendant une heure

L'exploitation des références bibliographiques a relaté qu'au vue des inconvénients multiples, les luminaires à incandescence ont été déclassés depuis une dizaine d'années et finiront à être retirés de tout usage, l'étude s'est limitée à vérifier et à confirmer le désintéressement affiché par les industriels vis-à-vis de cette technologie en cédant la place à d'autres technologies, plus particulièrement les luminaires au LED .

.9.2. Résultats d'ACV comparatives des performances environnementales des luminaires de différentes technologies:

.9.2.1. ACV comparative entre luminaire HPS et luminaire LED :

La présente ACV comparative a analysé la fabrication, l'utilisation et la fin de vie (EoL) des luminaires composés d'une source lumineuse (lampe SHP ou barrette LED), d'un appareillage (ballast ou driver), des accessoires et du boîtier de chaque luminaire (fig.IV-19)

La phase de fabrication englobe l'acquisition des matières premières, les processus de fabrication des matériaux et des pièces, le transport des matériaux et des pièces et l'emballage, tant du produit intermédiaire que du produit final. L'utilisation ne représente que la consommation d'électricité pendant le fonctionnement. La modélisation de la fin de vie porte sur le transport et l'élimination des matériaux.

.9.2.2. Données relatives aux composants des luminaires et processus de fabrication :

Les données d’inventaire et de fabrication des luminaires HPS et LED sont portées, respectivement, sur les tableaux IV-9 et IV-10.

Il y a lieu de préciser que les données de l’inventaire sont obtenues essentiellement du démantèlement d’un luminaire SHP et d’un autre au LED.

Les luminaires démantelés aux fins de l’étude sont choisis parmi les modèles fréquemment utilisés par l’Etablissement Public de Réalisation et de Maintenance de l’Eclairage Public d’Alger – ERMA. Certaines données issues de la recherche bibliographique (Cf. Tab. IV-9) ont été mises à l’échelle et intégrées à cette étude [122] [123] [124]. Les références bibliographiques en question ont puisé dans les bases de données dédiées à l’ACV telle que Ecoinvent.

Tableau IV-9: Données d’Inventaire du Cycle de Vie du luminaire SHP selon Ecoinvent			
Données ICV du luminaire SHP/Partie Couverture (Verre + capot inférieur + réflecteur + Capot supérieur)			
Partie	Données Ecoinvent	Quantité	Unité
Couverture	Aluminium, mélange de production, alliage moulé, à l’usine.	6,93	Kg
Couverture	Fabrication de produits en aluminium, travail moyen des métaux	6,93	Kg
Couverture	Revêtement en poudre, tôle d’aluminium	0,0211	M ²
Couverture	Verre plat, non revêtu, à l’usine	0,864	Kg
Couverture	Trempe, verre plat	0,864	Kg
Couverture	Produit en silicone, à l’usine	0,074	Kg
Couverture	Acier chromé 18/8, à l’usine	1,15	Kg
Couverture	Fabrication de produit en acier chromé, travail moyen des métaux	1,15	Kg
Couverture	Isolateur en résine époxy (Al ₂ O ₃), à l’usine	0,207	Kg
Couverture	Emballage, carton ondulé, mixte fibre simple paroi, à l’usine	0,807	Kg
Couverture	Films d’emballage, LPDE, à l’usine	0,0546	Kg
Couverture	Papier, papier journal, en stockage régional	0,0102	Kg
Couverture	Transport, camion> Flotte moyenne de 16T	98,3	Tkm
Couverture	Electricité, moyenne tension, production, CENTREL, au réseau	126	Kwh
Couverture	80% de chaleur, gaz naturel à four industriel >100kW	133	Kwh
Couverture	20% de chaleur, mazout léger à four industriel 1MW	33	Kwh
Données ICV du luminaire SHP/ Partie Lampe SHP			
Partie	Données Ecoinvent	Quantité	Unité
Lampe	Tube en verre, borosilicate, à l’usine	0,0957	Kg
Lampe	Laiton, à l’usine	0,0219	Kg

Lampe	Chrome, en stockage régional	0,00137	Kg
Lampe	Cuivre, en stockage régional	0,0041	Kg
Lampe	Brasure, pâte, Sn95.5Ag3.9Cu0.6 pour l'industrie électronique, à l'usine	0,00547	Kg
Lampe	Oxyde d'aluminium, à l'usine	0,00820	Kg
Lampe	Mercure, liquide, à l'usine	0,000021	Kg
Lampe	Fabrication de produit métallique, travail moyen des métaux	0,0287	Kg
Lampe	Tréfilerie, cuivre	0,0041	Kg
Lampe	Transport, camion> Flotte moyenne de 16T	0,152	Tkm
Lampe	Navire de fret transocéanique	0,104	Tkm
Lampe	Xénon, gazeux, en stockage régional	0,00001	Kg
Lampe	Electricité de tension moyenne, production, au réseau	0,833	Kwh
Lampe	Emballage carton ondulé, mixte fibre, simple paroi, à l'usine	0,128	Kg
Données ICV du luminaire SHP/ Partie Ballast			
Partie	Données Ecoinvent	Quantité	Unité
Ballast	Nylon 66, à l'usine	0,0271	Kg
Ballast	Résine de polyester non saturé, à l'usine	0,00037	Kg
Ballast	Fabrication de produits métalliques, à l'usine, travail moyen des métaux	0,00308	Kg
Ballast	Laiton, à l'usine	0,00308	Kg
Ballast	Film de tétrafluoro-éthylène, sur verre	0,00493	Kg
Ballast	Cuivre, en stockage régional	0,248	Kg
Ballast	Tréfilage, cuivre	0,248	Kg
Ballast	Acier chromé 18/8, laminage de tôles, à l'usine	1,76	Kg
Ballast	Laminage de tôles, acier chromé	0,310	Kg
Ballast	Revêtement de zinc, pièces	0,00544	M ²
Ballast	Produit en acier chromé, fabrication, travail moyen des métaux	1,45	Kg
Ballast	Condensateur, type électrolyte, hauteur >2cm, à l'usine	0,137	Kg
Ballast	Aluminium, mix de production, à l'usine	0,01	Kg
Ballast	Laminage de tôles, aluminium	0,01	Kg
Ballast	Electricité de moyenne tension, production UE, au réseau	0,888	Kwh
Ballast	Transport, camion >flotte moyenne de 16T	8,18	Tkm
Données ICV du luminaire SHP/ Partie Condensateur de compensation			
Partie	Données Ecoinvent	Quantité	Unité
Condensateur de compensation	Condensateur, film, montage traversant, à l'usine	0,868	Kg

Tableau IV-10 : Données d'Inventaire du Cycle de Vie du luminaire LED selon Econinvent

Données ICV du luminaire LED/ Partie Couvercle - Refroidisseur			
Partie	Données Ecoinvent	Quantité	Unité
Couverture	Aluminium, Mélange De Production, Alliage Moulé, à L'usine	12,9	Kg
Couverture	Fabrication de produits en Aluminium, Travail moyen des métaux	12,9	Kg
Couverture	Anodisation, tôle d'aluminium	0,00526	M ²

Couverture	Revêtement en poudre, tôle d'aluminium	0,654	M ²
Couverture	Feuille d'aluminium à rouler	0,0877	Kg
Couverture	Acier chromé 18/8, à l'usine	0,219	Kg
Couverture	Fabrication de produit en acier chromé, travail moyen des métaux	0,219	Kg
Couverture	Verre plat, non revêtu, à l'usine	1,14	Kg
Couverture	Trempe, verre plat	1,14	Kg
Couverture	Produit à base de silicone, à l'usine	0,0572	Kg
Couverture	Copolymère acrylonitrile - Butadiène – Styrène - ABS, à l'usine	0,100	Kg
Couverture	Moulage par injection	0,100	Kg
Couverture	Electricité de moyenne tension, Production CENTREL, au réseau	189	Kwh
Couverture	Chaleur, Gaz naturel, au four industriel >100kw	208	Kwh
Couverture	Chaleur, Mazout léger, au four industriel 1MW	52	Kwh
Couverture	Emballage, carton ondulé, simple paroi	2,66	Kg
Couverture	Films d'emballage, LPDE, à l'usine	0,0622	Kg
Couverture	Papier, papier journal, en stockage régional	0,0319	Kg
Couverture	Polyuréthane, Mousse rigide, à l'usine	0,137	Kg
Couverture	Transport, camion >Flotte moyenne de 16T	141	Tkm
Données ICV du luminaire LED/ Partie Circuit LED			
Partie	Données Ecoinvent	Quantité	Unité
Circuit LED	Composant LED (US DOE)	0,0343	Kg
Circuit LED	Aluminium, mélange de production, alliage moulé, à l'usine.	0,134	Kg
Circuit LED	Fabrication de produit d'aluminium, travail moyen des métaux	0,134	Kg
Circuit LED	Copolymère Acrylonitrile - Butadiène – Styrène - ABS, à l'usine	0,0122	Kg
Circuit LED	Moulage par Injection	0,0122	Kg
Circuit LED	Cuivre, en stockage régional	0,0336	Kg
Circuit LED	Tréfilage, Cuivre	0,0336	Kg
Circuit LED	Transport, Navire de fret transocéanique	0,284	Tkm
Circuit LED	Transport, camion flotte moyenne >16T	0,439	Tkm
Données ICV du luminaire LED/ Partie Driver (Pilote)			
Partie	Données Ecoinvent	Quantité	Unité
Driver	Copolymère Acrylonitrile - Butadiène – Styrène - ABS, à l'usine	0,184	Kg
Driver	Moulage par injection	0,184	Kg
Driver	Carte de câblage imprimé, montage en surface, surface sans plomb, à l'usine	0,00647	M ²
Driver	Carte de câblage imprimé, trou traversant, surface sans plomb, à l'usine	0,00647	M ²
Driver	Condensateur, Film, Montage traversant, à l'usine	0,00827	Kg
Driver	Condensateur, non spécifié, à l'usine	0,00182	Kg
Driver	Condensateur, Electrolyte type, hauteur < 2 cm, à l'usine	0,00113	Kg
Driver	Condensateur, Electrolyte type, hauteur > 2 cm, à l'usine	0,0137	Kg
Driver	Diode, Verre, montage traversant, à l'usine	0,000553	Kg
Driver	Résistance, type film métallique, montage traversant, à l'usine	0,00117	Kg

Driver	Transformateur, utilisation basse tension, à l'usine	0,0678	Kg
Driver	Composant électronique, passif, non spécifié, a l'usine	0,000976	Kg
Driver	Résistance, non spécifiée, à l'usine	0,00151	Kg
Driver	Résistance, type SMD, montage en saillie, à l'usine	0,000404	kg
Driver	Diode, Verre, type SMD, montage en saillie, à l'usine	0.000171	Kg
Driver	Circuit intégré, IC, type logique, à l'usine	0,000129	kg
Driver	Condensateur, type SMD, montage en saillie, à l'usine	0,000518	Kg
Driver	Composant électronique, actif, non spécifié, à l'usine	0,0000257	kg
Driver	Transistor, type SMD, montage en saillie, à l'usine	0,000426	kg
Driver	Composant électronique, actif, non spécifié, à l'usine	0,0000171	Kg
Driver	Diode, non spécifié, à l'usine	0,000133	Kg
Driver	Nylon 66 GF 30 composé (PA 66 GF 30), mélange de production, à l'usine	0,193	kg
Driver	Acier chromé 18/8, à l'usine	0,00741	Kg
Driver	Fabrication de produit en acier chromé, travail moyen des métaux	0,00741	Kg
Driver	Cuivre, primaire, à la raffinerie	0,00705	kg
Driver	Etain, en stockage régional	0,000261	kg
Driver	Transport , Camion 16-32t	0,466	tkm
Driver	Montage, technologie de trou traversant, soudure sans plomb	0,0129	M ²
Driver	Montage, technologie de montage en saillie, soudure sans plomb	0,0129	M ²
Driver	Carton ondulé, fibre de recyclage, simple paroi, à l'usine	0,0714	kg
Driver	Carton ondulé, fibre de recyclage, double paroi, à l'usine	0,0657	Kg
Driver	Polystyrene, expansible; à l'usine	0,00643	Kg
Driver	Film d'emballage, LDPE, à l'usine	0,000571	Kg
Driver	Palette plate	0,000372	P
Driver	Cuivre, en stockage régional	0,0425	kg
Driver	Tréfilage , Cuivre	0,0425	kg

.1.1.1. Données relatives aux processus de fabrication des luminaires SHP et LED:

Étant donné que les procédés de fabrication spécifiques ne sont pas connus avec précision, il est, continuellement, fait recours dans la base de données Ecoinvent aux procédés globaux (ou génériques) dénommés «fabrication de produits métalliques, moyenne métallurgie/RER S» adopté comme processus de fabrication principal impliqué lors de la fabrication de la majorité des pièces des deux types de systèmes d'éclairage.

Des données supplémentaires et des données énergétiques des systèmes d'éclairage à lampe HPS et à LED sont extraites de publications se référant souvent à la base de données Ecoinvent [125].

Chapitre IV : ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A « LED »

A l'issue de la réalisation de l'inventaire (ICV), il sera indispensable d'attribuer les résultats de l'Inventaire du Cycle de Vie aux catégories d'impact sélectionnées (classification) pour pouvoir ensuite faire le calcul du score de chaque élément (score élémentaire) avant de passer à la sommation des scores de caractérisation relevant de la même catégorie intermédiaire (regroupement). Cette démarche est valable pour toutes les phases du cycle de vie. In fine et après agrégation, chaque catégorie intermédiaire sera représentée par un seul score englobant le cycle de vie du luminaire en entier. La majorité des calculs ne sont opérés par l'analyste du cycle de vie mais, plutôt, effectués en arrière-plan par le logiciel d'ACV qui fait appel aux équations définies dans la méthode ACV retenue et en tenant compte des divers paramétrages effectués par l'analyste.

Les catégories intermédiaires d'impact considérées comprennent :

- *AP = acidification potential (Potentiel d'acidification);*
- *GWP = global warming potential (Potentiel de Changement Climatique),*
- *EP = eutrophication potential (Potentiel d'eutrophisation);*
- *FAETP = Freshwater aquatic ecotoxicity potential (Potentiel d'Ecotoxicité des Eaux Douces);*
- *HTP = human toxicity potential (Potentiel de Toxicité Humaine),*
- *MAETP = Marine aquatic ecotoxicity potential (Potentiel d'Ecotoxicité Marine) ,*
- *POCP = photochemical ozone creation potential (Potentiel de Création de l'Ozone Photochimique);*
- *ADP = Abiotic Depletion Potential (Potentiel d'Épuisement Abiotique)*
- *ODP = Ozone Depletion Potential (Potentiel de Dégradation de l'Ozone);*
- *TETP = Terrestrial Ecotoxicity Potential (Potentiel d'Ecotoxicité Terrestre).*

Catégories d'impacts non modélisées :

- *Radiation ionisante: absence de substances radioactives dans l'inventaire;*
- *Utilisation des sols: impact négligeable (des usines de fabrication de luminaires SHP est composants se convertissent en usine de production de luminaires LED et composants);*
- *Ecotoxicité d'eau douce pour les sédiments, Ecotoxicité d'eau marine pour les sédiments : impacts supposés minimes.*

Les catégories de dommages n'ont pas fait l'objet d'évaluation ce qui réduit les incertitudes liées à l'évaluation des dommages environnementaux potentiels.

D'après une étude réalisée par Leena Tahkamo, l'ACV comparative des luminaires à lampe HPS et à LED selon dix (10) indicateurs environnementaux a donné les résultats, ci-dessous :

Tab. IV-11 : Comparaison du cycle de vie d'un luminaire SHP et d'un luminaire LED selon dix (10) indicateurs environnementaux (UF : éclairage d'un tronçon de route de trente (30) mètre pendant une durée de quinze (15) ans avec un flux lumineux de 20 000 Lumens)

Catégorie d'impact	Abréviation	Unité	Impacts du cycle de vie		Impacts pour la phase de fabrication	
			Luminaire SHP	Luminaire LED	Luminaire SHP	Luminaire LED
Acidification	PA	Kg SO2 éq.	34,6	28,7	0,781	3,48
Changement climatique	GWP	Kg CO2 éq.	7920	6620	175	822
Eutrophisation	PE	Kg PO4 éq.	24,0	19,7	0,506	2,15
Écotoxicité aquatique d'eau douce	FAETP	Kg 1,4-DCB éq.	4110	3410	129	434
Toxicité humaine	HTP	Kg 1,4-DCB éq.	5490	4870	410	1076
Écotoxicité aquatique marine	MAETP	Kg 1,4-DCB éq.	13,2	11,1	354	1480
Formation de photo-oxydants	POCP	Kg C2H4 éq.	1,47	1,23	0,0591	0,176
Épuisement des ressources abiotiques	ADP	kg Sb éq.	58,7	48,5	1,74	5,90
Appauvrissement de l'ozone stratosphérique	ODP	kg CFC-11 eq./kg	0,408	0,329	0,0434	0,0556
Écotoxicité terrestre	TETP	kg 1,4-DCB éq.	144	110	1,39	4,08
Moyenne (CML)	/	/	100%	84%	33%	100%
Éco-indicateur 99	/	/	433	364	14,4	50,3

Les données agrégées du tableau IV-11 montrent qu'au plan du cycle de vie global, le luminaire LED présente plus d'avantages que celui à base de lampe SHP.

L'étape de fabrication est la seule phase du cycle de vie qui est en faveur du luminaire SHP et qui au regard de l'évolution rapide des processus industriels de production du LED ne pourra maintenir cette position avantageuse.

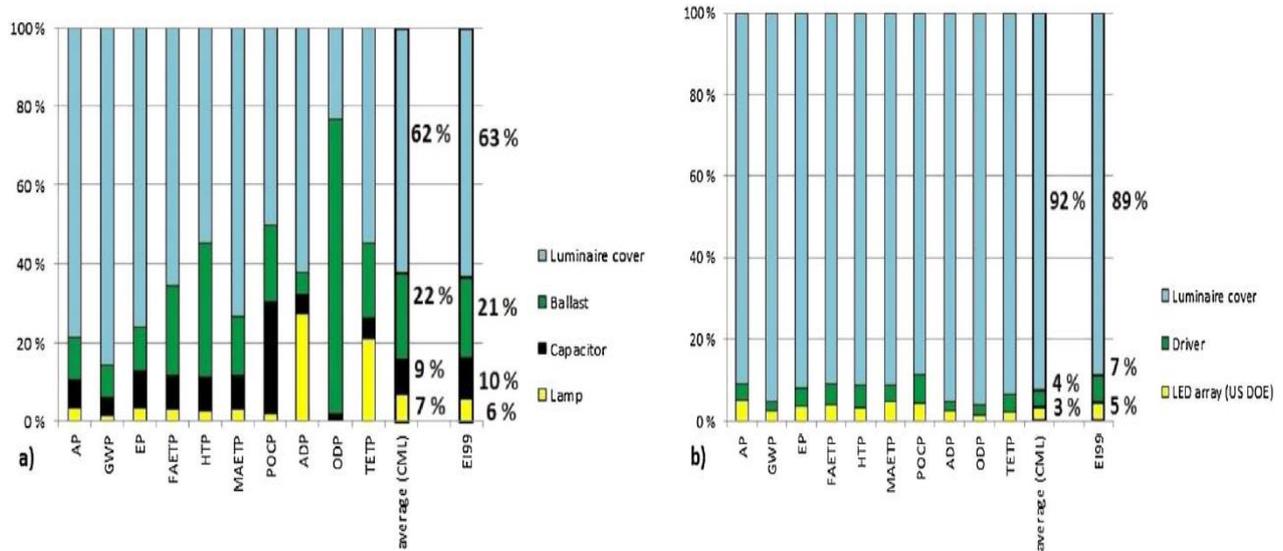


Fig. IV-22 : Les impacts environnementaux de production (a) d'un luminaire SHP et (b) d'un luminaire LED.

(AP = acidification potential, GWP = global warming potential, EP = eutrophication potential, FAETP = freshwater aquatic ecotoxicity potential, HTP = human toxicity potential, MAETP = marine aquatic ecotoxicity potential, POCP = photochemical ozone creation potential, ADP = abiotic depletion potential. ODP = ozone depletion potential. TETP = terrestrial ecotoxicity potential).

La comparaison de la phase de l'utilisation des deux types de luminaires sur la base de l'unité fonctionnelle qui consiste à éclairer un (01) kilomètre de route pendant la durée de vie a abouti à la représentation illustrée par la figure IV-23.

Le modèle montre que sur le score agrégé (unique) ainsi que sur l'ensemble des catégories d'impacts environnementaux, le luminaire à LED produit en 2020 présente des avantages significatifs le rendant plus durable que les autres luminaires conventionnels.

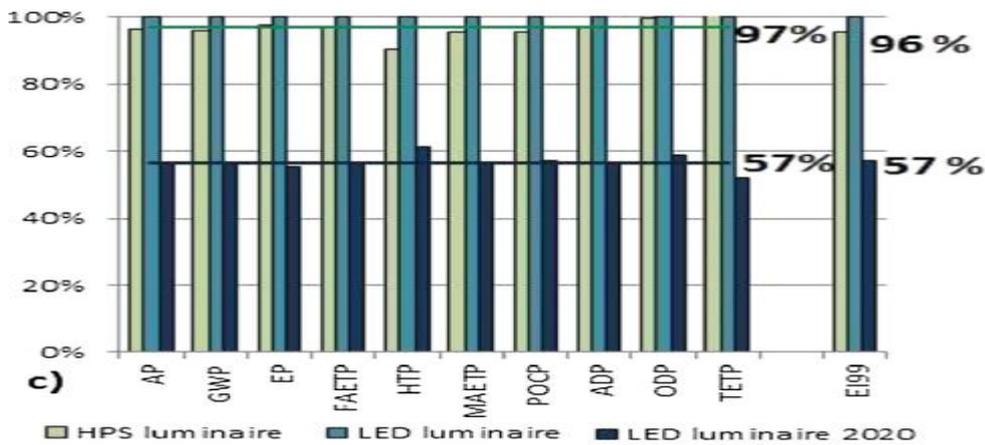


Fig. IV-23 : Comparaison entre impacts environnementaux de la phase utilisation des luminaires SHP et LED par kilomètre de route éclairé

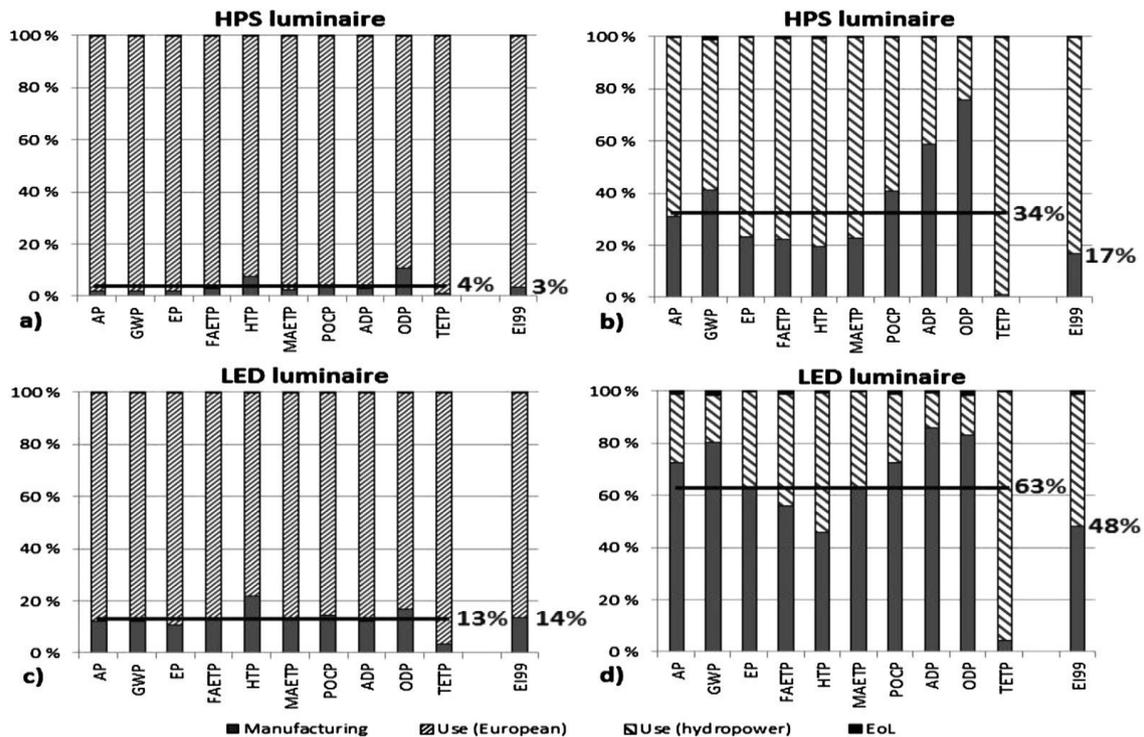


Fig. IV-24 : Impacts environnementaux de la fabrication, l'utilisation et la fin de vie pour :
 (a) Luminaire SHP utilisant le mix énergétique européen;
 (b) Luminaire SHP utilisant l'énergie hydroélectrique;
 (c) Luminaire LED utilisant le mix énergétique européen; et
 (d) luminaire LED utilisant l'énergie hydroélectrique.

.1.1.2. ACV comparative entre luminaire LED et luminaire CMH (Ceramic Metal Halide/Halogénure Métallique Céramique)

Dans l'objectif de positionner la comparaison réalisée au titre de cette étude et situer la place de la technologie avec d'autres technologies d'éclairage, nous avons procédé à une consultation bibliographique et webographique afférentes à ces aspects, qui à l'issue, nous a permis de confirmer un consensus relatif quant à l'avantage du luminaire LED sur le plan énergétique, environnemental et de la qualité de lumière.

Dans l'article portant comparaison entre les cycles de vie des luminaires LED et CMH utilisés pour l'éclairage routier [126], Sabina Abdul Hadi a communiqué des résultats favorables à celui à LED au niveau de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ particulièrement durant la phase d'utilisation (fig. IV-25 a). Dans la phase de fabrication, le LED présente moins de performances environnementales (fig. IV-25 a), les données en question corroborent les résultats obtenus au terme de notre étude.

Ces résultats sont relatés sommairement certains de ces résultats publiés durant l'année 2013.

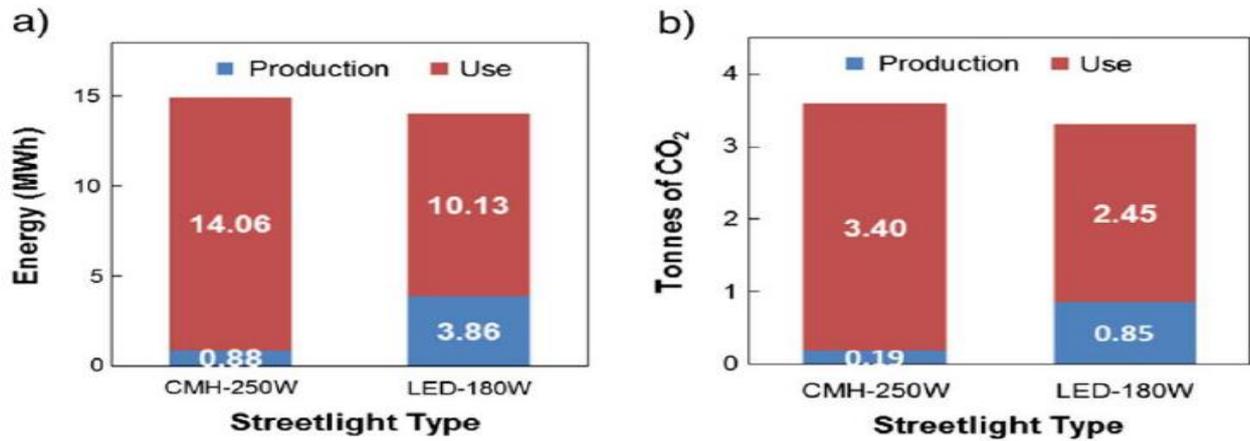


Fig. IV-25 : comparaison de (a) la consommation d'énergie et (b) émission du dioxyde de carbone pour des luminaires CMH (250 w) et LED (180 w) pendant la production et utilisation en éclairage public sous réseau électrique conventionnel.

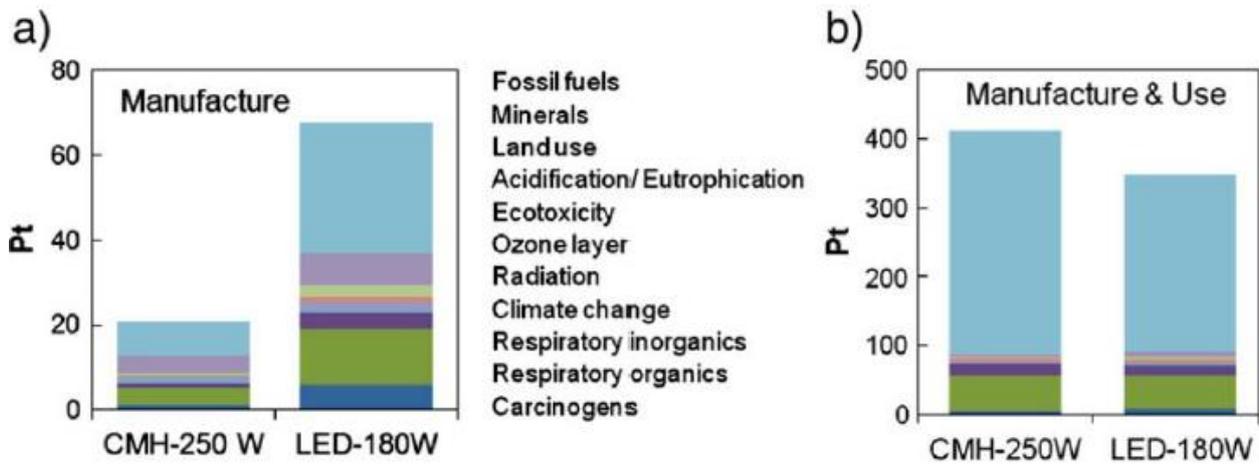


Fig. IV-26 : Évaluation de l'impact par la méthode du score unique pour les luminaires CMH et LED pendant l'étape de fabrication (a) et à la fois la fabrication et la durée de vie opérationnelle (b) (vue hiérarchique).

.1.2. Interprétation

.1.2.1. Approche et éléments d'interprétation des résultats d'ACV :

L'interprétation des calculs effectués et des représentations produites à travers diverses requêtes opérées sur le logiciel de modélisation ACV, a porté essentiellement sur:

- Des résultats liés à l'intégralité du cycle de vie des deux (02) luminaires ;
- Des résultats relatifs aux différentes phases du cycle de vie de manière parallèle entre les deux (02) luminaires (Production 1 Vs Production 2, Utilisation 1 Vs Utilisation 2, Fin de vie 1 Vs Fin de vie 2) en identifiant la plus contributrice et en déterminant d'éventuels déplacements d'impacts (d'une catégorie d'impact à une autre/d'une phase du CV à une autre/d'un composant à un autre);
- Des résultats relatifs aux phases de cycle de vie de chaque luminaire (Production Vs Utilisation, Utilisation Vs Fin de vie)
- Des résultats afférents aux composants de chaque luminaire en identifiant les plus contributifs;
- Des résultats liés aux processus et/ou aux substances de l'inventaire du cycle de vie de chaque luminaire en déterminant les plus contributifs

.1.2.2. Interprétation des résultats globaux liés à l'intégralité du cycle de vie des deux (02) luminaires SHP et LED :

La comparaison de l'intégralité du cycle de vie des deux luminaires (projecteurs) fait ressortir:

- Un avantage globale équivalent à 16% en faveur du LED (84% pour le LED contre 100% pour le SHP);
- Sur le score unique le LED (avec 364 points) est de 69 points moins impactant que le SHP (avec 433 points).

Ces écarts s'expliquent par les économies de consommation d'énergie générées par le luminaire LED en phase d'utilisation engendrant une réduction des impacts liés au processus de production de l'électricité alimentant les luminaires qui est le facteur principal favorisant dans les scores globaux (liés à l'intégralité du cycle de vie) le LED par rapport au SHP.

.1.2.3. Interprétation des résultats partiels liés aux différentes phases du cycle de vie des deux (02) luminaires :

.1.2.3.1. Comparaison de la phase de fabrication (Production) des deux luminaires :

L'examen des indicateurs de la phase Production des deux (02) luminaires montre :

- Un score nettement en faveur du SHP 36 points de plus par rapport au LED (14,4 pour le SHP contre 50,3 pour le LED)

Cet écart est lié beaucoup plus aux processus de fabrication du refroidisseur, du driver, du circuit LED (COB) ainsi que les lentilles (verre de LED) font appel à des techniques avancées et des matériaux nobles (rares) pour la production des matériaux et leur transformation en pièces nécessaires pour le LED ce qui a un effet démultiplicateur des impacts environnementaux ;

La fabrication du luminaire LED enregistre au niveau de la catégorie changement climatique :

- Un score trop élevé comparativement au SHP (822 contre 175 Kg CO2 éq).

Ceci peut s'expliquer par l'utilisation excessive de l'énergie électrique comme ressource élémentaire entrant dans le processus de production des différents composants du luminaire LED.

- Il en est de même pour L'écotoxicité aquatique d'eau douce et marine ou le LED est nettement plus contributif que le SHP.

L'extraction et la production des substances liées à la fabrication du Driver et du circuit LED sont à l'origine des impacts en question.

.1.2.3.2. Comparaison de la phase d'utilisation des deux luminaires (SHP et LED):

L'examen des indicateurs de la phase Utilisation des deux (02) luminaires montre un score de plus de 40% en faveur du LED :

- La phase utilisation des luminaires SHP et LED contribue à l'impact environnemental à raison de:
 - 96% pour le luminaire SHP
 - 57% pour le luminaire LED

Cet avantage pour le luminaire LED est surtout provoqué par les avancées technologiques (notamment lors de la dernière décennie) ayant permis d'améliorer les performances du LED notamment en matière d'efficacité lumineuse et énergétique au point où il serait actuellement

Chapitre IV : ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A « LED »

possible de remplacer un luminaire SHP de 250 w par un luminaire LED de 150 w voire de 130 w pour la gamme de qualité supérieure (le gain d'énergie est de 50 w donc 48% au minimum).

Pendant les quinze (15) années d'utilisation, un luminaire HPS de 250 w consomme 15,75 MWh et un luminaire LED de 200 w consomme 12,6 MWh. (15 ans X 4200 heures de fonctionnement X Puissance du luminaire (250 w ou 200 w)). La différence de consommation pendant la durée de vie est de 3000 Kw/h se répercutant sur le plan environnemental et confère un avantage considérable pour le luminaire LED sur le plan des impacts environnementaux comme illustrent les données du tableau, ci-dessous.

Tab. IV-11 bis : Comparaison de l'efficacité énergétique et l'empreinte carbone des luminaires SHP et à l'aide pendant la phase d'utilisation		
Elément de comparaison	Luminaire SHP	Luminaire LED
Puissance	250 w	200 w
Durée de fonctionnement heures (15 *4000h) =	60 000 heures	60 000 Heures
Quantité d'énergie consommée	15 000 000 w/h = 15 000 Kw/h	12 000 000 w/h = 12 000 Kw/h
Taux/luminaire SHP	100%	80%
	Gain = 20%	
Emission CO2/Kwh Bouquet énergétique à dominante gaz naturel (Ecoinvent)	227 g CO2 éq. par Kwh	
GWP (pendant 15 ans d'utilisation)	3 405 000 g = 3405 Kg de CO2 éq. = 3,405 Tonnes CO2 éq.	2 724 000 g = 2724 Kg de CO2 éq. = 2,724 Tonnes CO2 éq.

La contribution élevée dans l'impact environnemental agrégé du luminaire SHP durant la phase d'utilisation est due essentiellement à sa forte consommation de l'énergie comparée à celle du LED. Cette consommation est provoquée par le fonctionnement des composants du luminaire (énergie réactive) et de lampe qui a besoin pour démarrer à froid d'une tension d'amorçage de 800 à 5000V convertie en chaleur.

La modélisation du potentiel de réchauffement climatique et de la consommation de l'énergie de la phase utilisation (voir fig) a été réalisée sur la base de la consommation moyenne d'électricité en se

réfèrent au mix énergétique proche de celui de l'Algérie (Turbine à gaz 59%, Turbine à vapeur 12%, Cycle combiné 23%, Diesel 2%, Energie renouvelable 3%, Hydraulique 1% (2018)).

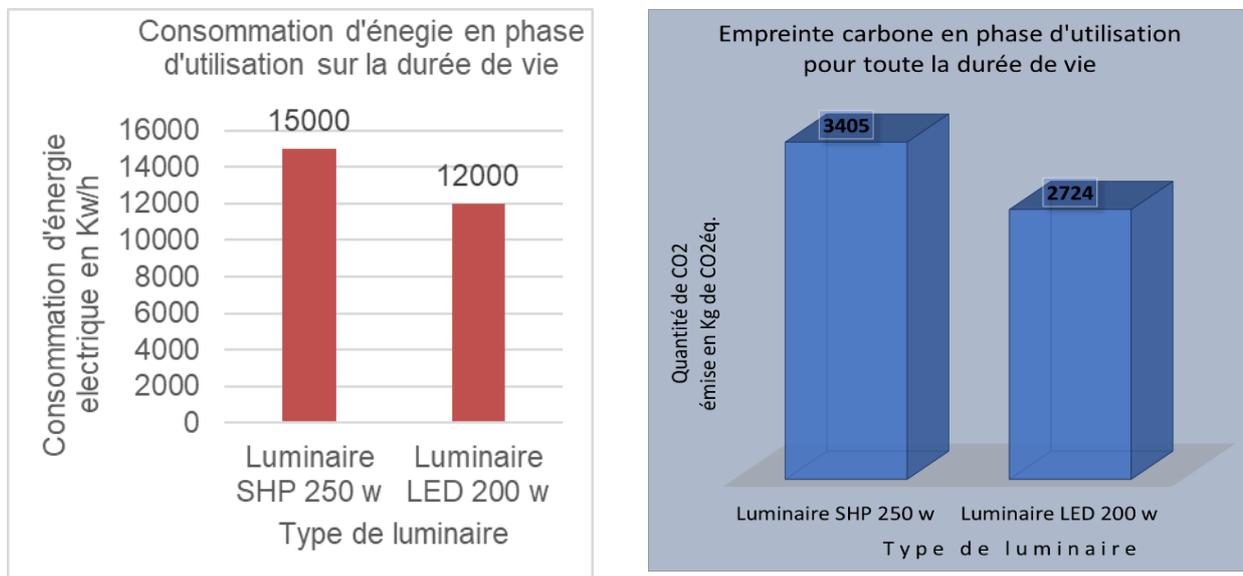


Fig. IV-26 bis : Efficacité énergétique et potentiel de réchauffement climatique des deux (02) luminaires

.1.2.3.2.1. Confirmation de l'avantage du LED par rapport au SHP en phase d'utilisation :

En complément de l'ACV réalisée, l'avantage du LED par rapport au SHP en phase d'utilisation a été confirmé par le recoupement des données expérimentales fournies par des organismes professionnels, à savoir :

- Données de la Société Nationale du Gaz et de l'Electricité (SONELGAZ);
- Données de la Direction de Wilaya des Travaux Public (DWTP) de Boumerdes;
- Données Entreprise d'Eclairage Public d'Alger (ERMA);
- Résultats de diverses expérimentations postées sur Internet.

.1.2.3.3. Comparaison de la phase de fin de vie des deux (02) luminaires SHP et LED:

Les catégories d'impacts qui ont les scores le plus élevés pendant la phase de fin de vie des deux (02) luminaires (SHP et LED) sont :

- L'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) ;

- L'épuisement des ressources (ADP) ; et
- Le potentiel du changement climatique (GWP).

Ceci s'explique par le fait que les processus de fin de vie font appel à une forte consommation de l'Energie pour faire fonctionner les installations de recyclage, de valorisation énergétique et d'incinération qui sont à l'origine des pressions environnementales élevées pour les trois (03) catégories sus citées.

.1.2.4. Comparaison des phases du cycles de vie au niveau du même luminaire :

Pour chacun des luminaires, la comparaison a porté sur les phases:

- Production Versus Utilisation;
- Utilisation Versus Fin de vie.

Les scores agrégés sont repris sur le tableau, ci-dessous :

Tab. IV-11 ter : comparaison des scores environnementaux (uniques) des phases de cycle de vie des luminaires SHP et LED		
Type de luminaire	Phases comparées	
	Production Vs Utilisation	Utilisation Vs Fin de vie
Luminaire SHP:	3% contre 97%	83% contre 17% en fin de vie;
Luminaire LED:	14% contre 86%	52% contre 48% en fin de vie;

- Les résultats du tableau relatent que la phase d'utilisation enregistre le score majeur des impacts par rapports aux autres phases du cycle de vie et ce pour les deux types de luminaires.

Cette tendance s'explique par l'étendue de la durée de vie et sa pression sur la consommation d'énergie électrique et par ricochet sur l'environnement comme expliqué précédemment.

Le désavantage environnemental du LED pendant les autres phases (production et fin de vie) est dû aux matériaux et processus technologiques liés à ces dernières. A titre d'exemple, la production du LED exige l'acquisition de matériaux critiques tel le Gallium (dont le coût est 07 fois celui du Fer, il faut également extraire 50 tonnes de roches pour produire 1Kg de Gallium et il faut utiliser

200m³ d'eau pour purifier une tonne de roche...), l'Indium, le phosphore, l'aluminium, le bauxite... ce qui laisse les potentiels d'épuisement des ressources, d'appauvrissement de la couche d'ozone et du réchauffement global trop élevés au niveau des deux phases évoquées.

Le traitement en fin de vie du luminaire LED exige la mise en place de processus spéciaux liés au traitement (recyclage, valorisation...) des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques – DEEE expliqués plus loin dans cette étude.

Les processus en question font appel à des technologies avancées dans le domaine d'extraction, du recyclage et de la valorisation des déchets donnant lieu à des impacts environnementaux du luminaire LED plus conséquents que ceux du luminaire SHP.

A souligner également que l'arrivée en fin de vie du circuit LED (ou du driver) engendre souvent le remplacement de tout le luminaire au lieu du remplacement de l'élément défaillant. Ceci génère un important volume de déchets et constitue, par conséquent, une charge environnementale supplémentaire. Dans le luminaire SHP, il est plus pratique de changer uniquement la lampe SHP ce qui constitue un facteur de minimisation des déchets.

.1.2.5. Comparaison des contributions des composants dans la charge environnementale :

Pour pouvoir représenter sur un même graphique et comparer les impacts des différents composants, chaque résultat (valeur calculée d'indicateur) d'un impact environnemental du luminaire (SHP et LED) à été ramené à une valeur de 100%, ensuite nous avons procédé au calcul des résultats d'impacts pour chaque composant.

Le graphique IV-22, illustre le poids (l'influence) environnemental, pendant la production (fabrication), de chaque composant du luminaire SHP et LED dans les dix (10) indicateurs d'impacts considérés.

Lors de la fabrication la partie du luminaire engendrant le plus d'impact est:

- Pour le luminaire SHP: Le Boitier du luminaire contribue à l'impact global à hauteur de 63% ;
- Pour le LED: le boitier contribue à l'impact global à hauteur de 89%.

La forte contribution du boitier aux impacts environnementaux pour les deux (02) luminaires est due au processus d'extraction et de production de l'aluminium (matériaux principal et critique) et sa transformation en pièces ainsi qu'à l'acier chromé et le verre (de l'optique du SHP et des lentilles

Chapitre IV : ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A « LED »

pour le LED). A noter que le poids du boîtier (couverture) représente respectivement 44% et 62% ce qui donne une idée sur la quantité d'énergie nécessaire pour la production des quantités en question et les répercussions en matière d'impacts environnementaux qui en découlent.

Pour plus d'explication de l'origine des impacts conséquents, nous reprenant le schéma ci-dessous illustrant la complexité des processus liés à l'extraction et la production de l'aluminium et par conséquent l'ampleur de leur contribution dans la charge environnementale.

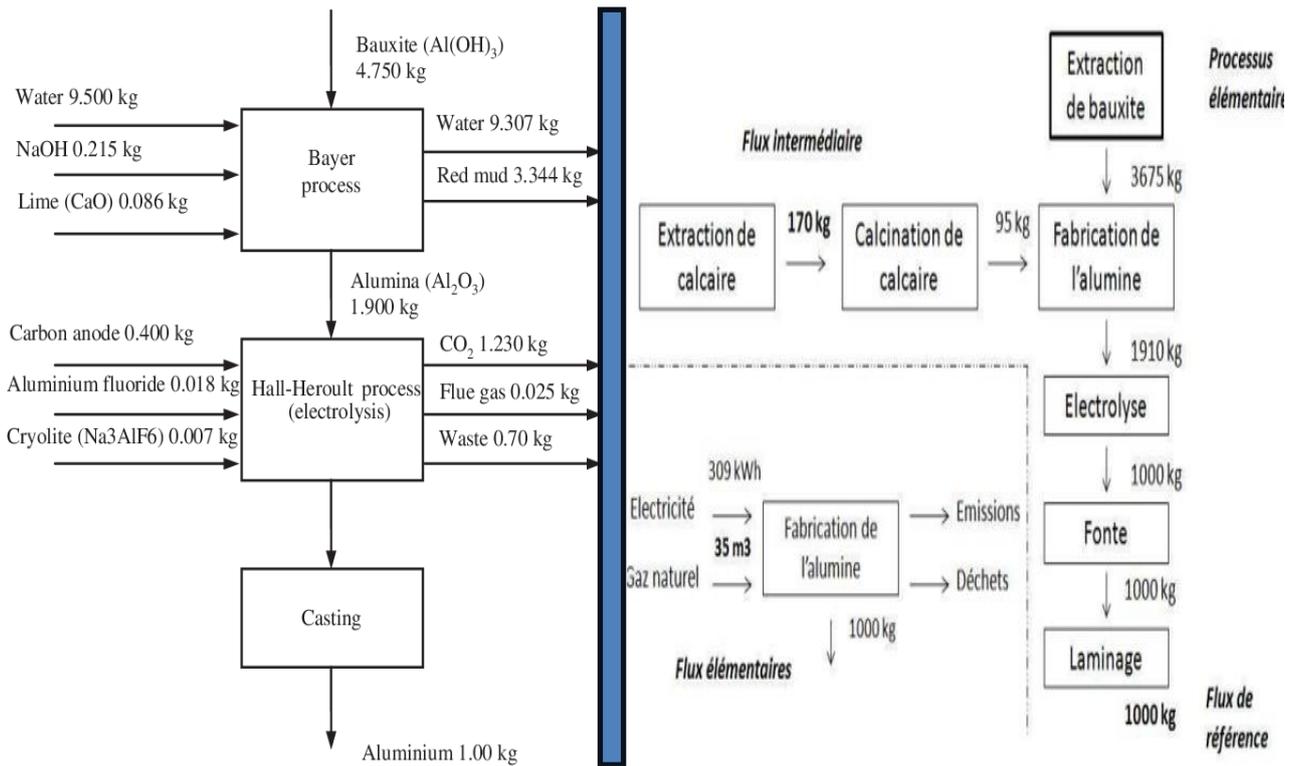


Fig. IV-26 ter : illustration des quantités des ressources (matériaux et énergie) requises pour la production de l'aluminium laminé pour la mise en évidence de l'ampleur des impacts environnementaux

Lors de la fabrication, le Ballast du luminaire SHP et le Driver du LED viennent en 2ème position en matière de contribution dans les impacts environnementaux de la fabrication et ce à cause des matériaux utilisés (Al, Cu...) produits à travers des processus industriels complexes.

Pour le luminaire SHP:

- Le Ballast du luminaire contribue à l'impact global à hauteur de 21% , ce qui est proportionnel à son poids représentant 39,5% du poids total du luminaire.

Pour le luminaire à LED:

- Le Driver qui, malgré sa masse réduite par rapport au poids total du luminaire LED, contribue à l'impact global à hauteur de 7%. Cette proportion sensible s'explique par la

nature des matériaux et des procédés utilisés pour la production de ses composants électroniques.

Par déduction :

- Le pourcentage de contribution de lampe SHP est de 06% (Poids = 9.37%) par contre le circuit LED - COB contribue à 05% (poids = 3,25%).

.1.2.6. Catégories d'impacts pertinentes

.1.2.6.1. Catégories d'impacts pertinentes engendrées par le luminaire SHP :

Les catégories d'impacts les plus pertinentes engendrées par le boîtier du SHP sont:

- Le GWP, l'AP, l'EP et MAETP.

Ces impacts élevés ont pour cause principale, comme expliqué plus haut, les processus liés à l'extraction et la production de l'Al/quantité utilisée (=70% du poids) ainsi que de l'acier chromé, résine époxy (Al₂O₃)...

Les catégories d'impacts les plus pertinentes engendrées par le ballast du SHP sont:

- Le ODP, HTTP et FAETP.

La cause principale de ses impacts est la production de l'Al, Cu, Zin, Acier Chromé/quantité utilisée, laiton (cuivre, zinc et les éléments d'addition comme le plomb, l'étain, le nickel, le chrome et le magnésium)

Les catégories d'impacts les plus pertinentes engendrées par la lampe sont:

- L'ADP ainsi que le TETP.

la cause principale est la production du sodium, Laiton, chrome, cuivre, Etain, Argent, oxyde d'Al, Mercure, Xénon ainsi que le verre borosilicate (silice (SiO₂), trioxyde de bore (B₂O₃), oxydes alcalins (Na₂O; K₂O), alumine (Al₂O₃), oxydes alcalins (CaO, MgO...) dont leur utilisation impacte fortement l'épuisement des ressources qui s'ajoute à leur potentiel de toxicité.

.1.2.6.2. Catégories d'impacts pertinentes engendrées par le luminaire LED :

L'impact le plus important pendant la phase de fabrication est engendrée par le boîtier du LED avec un score moyen de 90%.

Les catégories d'impact qui pèsent le plus sont :

- Le GWP, l'ADP et ODP

La cause principale est la production de l'Al/quantité utilisée (=70% du poids du luminaire) ainsi que de l'acier chromé, résine époxy (Al₂O₃)

Les catégories d'impacts les plus pertinentes engendrées par le boîtier du LED sont:

- Le ODP, HTTP et FAETP.

La fabrication du driver et du COB (module LED) ont un faible impact sur l'ensemble des catégories (moyenne: 7% et 5%)

.1.3. Interprétation de la comparaison entre les impacts environnementaux du luminaire LED et celui en CMH :

La comparaison des catégories d'impact du luminaire LED avec d'autres gammes de luminaires notamment ceux à Ampoule « Ceramic Metal Halides –CMH » (halogénures métalliques céramiques) a relaté les mêmes tendances.

- Le LED garde ses avantages environnementaux avec un score unique pour le GWP (Fabrication + utilisation) de 3,3 contre 3,59 tonnes de CO₂ pour le CMH ce qui permet de noter une tendance similaire à celle de la comparaison entre les luminaires LED et SHP (respectivement 2,7 et 3,4 tonnes de CO₂),
- Au niveau de l'efficacité énergétique l'illustration montre un avantage au profit du LED exprimé par le score de 10,13 contre 14,06 MW/H durant la durée de vie ce qui se traduit par une économie d'énergie avoisinant les 28% réalisée par l'utilisation du LED.
- Le cumul de consommation d'énergie des phases de production et d'utilisation relate: 13,99 MW/H pour le LED contre 14,94 pour le CMH donnant lieu à une différence de 7% en faveur du LED ;
- Lors de la phase de fabrication, le CMH fourni un score meilleur que celui du LED (20 points contre 65 points), l'interprétation est identique que celle évoquée lors de la comparaison entre le SHP et le LED;
- L'agrégation des impacts de la fabrication et de l'utilisation donnera un score nettement en faveur du LED (350 contre 410 points).
- Les arguments évoqués lors de l'interprétation des résultats de comparaison entre les luminaires SHP et LED sur l'ensemble des rubriques restent majoritairement valables pour la comparaison entre les luminaires CHH et LED.

.1.4. DISCUSSION ET CONCLUSIONS :

Il ressort de cette étude que les systèmes d'éclairage public ont une multiplicité d'impacts environnementaux dont le niveau de criticité diffère d'une technologie à une autre.

La diminution de la consommation d'énergie durant la phase d'utilisation est un élément clé et aurait un effet d'entraînement quant à la réduction de la majorité des autres impacts environnementaux.

La comparaison selon divers scores environnementaux liés aux phases du cycle de vie et selon des scores agrégés montre que la technologie LED possède, le plus d'avantages environnementaux comparativement aux autres technologies (SHP et CMH) particulièrement au niveau de la phase «Utilisation ».

Le score d'impact agrégé relatif au cycle de vie global du luminaire LED est de 69 points de moins comparativement au luminaire SHP, malgré que ce dernier a fourni des avantages pendant la phase de fabrication (14,4 points contre 50,3 points pour le LED). Ceci ne disqualifie pas le système à LED de sa position favorable du fait que les avantages de l'utilisation seraient plus rentables écologiquement sur la durée de vie.

La simulation sous divers scénarios de bouquets énergétiques étayera davantage la tendance des indicateurs environnementaux produits par les divers systèmes d'éclairage public.

L'unité fonctionnelle de référence la plus significative pour des luminaires d'éclairage public est le linéaire métrique (30 mètre de route dans notre cas qui pourrait être traduite en superficie éclairée) de route éclairée durant la durée de vie du luminaire et selon les critères de conception de l'éclairage routier (i.e : l'efficacité lumineuse et l'éclairement exigés). L'analyse effectuée sur cette base donnera plus de justesse aux indicateurs de caractérisation.

L'illustration de la figure IV-23, relate que les évolutions technologiques continuent à mener les performances énergétiques et environnementales à des niveaux plus intéressants. Les luminaires LED de 2020 produiraient des impacts environnementaux nettement inférieurs (40%) que les luminaires SHP par unité fonctionnelle (linéaire métrique éclairé). L'extrapolation de cette tendance améliorative laisse présager d'intéressantes performances pour l'éclairage public avec des systèmes à LED et à OLED (organic light-emitting diode /diode électroluminescente organique ou DELO) d'autant plus que ceux-ci s'y prêtent plus facilement aux divers dispositifs de contrôle (diming,

gradation, télégestion...) développés, ci-dessous, ce qui réduit sensiblement les impacts environnementaux de consommation d'énergie et de maintenance.

La durée de vie du luminaire LED de qualité pourra atteindre 50 000 h de fonctionnement, ce qui atténue considérablement les impacts issus de la fabrication, la maintenance et le traitement de fin de vie et favorisera davantage la durabilité de son déploiement dans les installations d'éclairage public.

La rapidité d'évolution des formes des luminaires et de leurs accessoires mène à penser que l'éventualité de récupération pour une réutilisation de certaines parties du luminaire n'a pas été prise en compte du fait que l'obsolescence éventuelle rendrait la disponibilité d'une pièce de rechange adaptée à l'issue de sa durée de vie (de 15 à 30 ans) compromise, par conséquent l'étude repose sur le fait que l'ensemble du luminaire qui sera remplacé par une nouvelle unité.

Les résultats de l'ACV objet de cette thèse, indiquent que les luminaires conventionnels (HPS et CMH) fournissent moins de performances environnementales que ceux des technologies LED et que les évolutions technologiques continuent à améliorer davantage les propriétés écologiques de ces derniers.

Dans son article portant «ACV comparative des technologies d'éclairage » publié en 2016, Hao Zhang a conclu que la technologie d'éclairage à LED présente globalement davantage de performances environnementales et pourrait réduire de 38% à 47% l'ensemble les indicateurs comparativement aux luminaires SHP et jusqu'à 90% pour les systèmes d'éclairage aux lampes incandescentes sur la totalité du cycle de vie.

L'extrapolation et l'analyse des tendances progressives de l'ensemble des paramètres laissent prédire qu'à mesure que la technologie LED progresse, les avantages environnementaux devraient devenir plus conséquents et que les problématiques énergétiques et environnementales liées à l'éclairage public seront majoritairement minimisées.

En recourant à des produits d'éclairage LED de qualité associés aux technologies smart (gradation, détection de présence, variation de puissance, télégestion, Internet des objets...), les systèmes d'éclairage public seront un levier incontournable de durabilité et d'optimisation des efforts de lutte contre les changements climatiques et leurs retombées désastreuses.

Cet aspect sera développé avec suffisamment de détails dans la section suivante.

OPTIMISATION DU SYSTEME D'ECLAIRAGE PUBLIC PAR LA SMART TECHNOLOGIE

L'éclairage classique des voiries consiste , actuellement, à un éclairage statique basé sur la mise en fonctionnement des luminaires qui émettent un éclairement constant tout au long de la nuit même en l'absence des usagers de l'espace public.

Ce mode d'éclairage est caractérisé, souvent, par :

- Un gaspillage de l'énergie due au mode, à la durée d'utilisation et aux sources lumineuses énergivores;
- Une usure accéléré des équipements engendrant des coûts de maintenance et de remplacement plus importants;
- Des nuisances lumineuses (pollution lumineuse);
- Des impacts environnementaux divers sur les espèces faunistiques, floristiques, santé humaine ainsi que l'accumulation des déchets.

La prise de conscience accrue des enjeux environnementaux ainsi que les coûts importants de l'énergie ont poussé les professionnels dans plusieurs pays à rechercher et mettre en place des solutions plus appropriées aux contraintes actuelles.

Le développement technologique offre actuellement des solutions innovantes en matière de gestion efficace et rationnelle des réseaux d'éclairage public visant à optimiser la consommation tout en réduisant les impacts environnementaux et en maintenant un très haut niveau de confort.

La présente partie de l'étude vise à cerner les moyens et les pistes susceptibles de limiter les nuisances lumineuses et de pouvoir faire face aux conséquences menaçantes pour la biodiversité et l'équilibre des écosystèmes. Elle consiste à examiner les avantages générés à l'issue du déploiement des solutions et des technologies innovantes qui pourraient faire de l'éclairage public un facteur de confort, de sécurité, de bien être d'une part et offrir des performances environnementales, énergétiques et économiques optimales, d'autre part.

L'appui par de nouveaux dispositifs réglementaires et normatifs adaptés au concept de la « smart city », l'éclairage durable, l'éclairage vert ou le « smart éclairage » viendrait répondre aux préoccupations majeures liées au déploiement et à l'utilisation irrationnelle de l'éclairage public classique caractérisé par son énergivoracité et ses risques environnementaux.

Le smart éclairage consiste à assurer continuellement un fonctionnement dynamique des luminaires qui, en plus, assurent un apport variable de lumière artificielle dans un environnement considéré et ce en fonction de la lumière naturelle existante et de la détection de présence d'usagers (véhicule, piéton...) avec la possibilité d'adapter automatiquement l'intensité lumineuse aux exigences et aux besoins normés.

Les composants électroniques photosensibles embarqués sur les luminaires déterminent avec précision la luminosité naturelle de l'environnement et calculant l'apport de la lumière artificielle nécessaire.

En outre, le système permet au luminaire de passer à plein régime, au moment de la détection de présence d'un usager et ensuite s'éteindre ou diminuer l'éclairage à des niveaux réduits (10 à 30%) en l'absence d'usagers,

L'interconnexion des luminaires reliés à une centrale de gestion offre la possibilité d'un contrôle à distance de l'état du réseau ainsi que son télé commandement aboutissant à une maintenance réactive, efficace, et moins coûteuse.

En sus de l'efficacité énergétique, de la longévité, de la qualité de la lumière offerte par la nouvelle génération de lampes LED, ces dernières s'y prêtent parfaitement à toutes les fonctionnalités sus citées outre la possibilité de recourir à des ressources renouvelables pour l'alimentation de l'installation telle la technologie photovoltaïque.

la diminution de la consommation de l'électricité du réseau d'éclairage peut atteindre un taux de 80% par rapport au niveau actuel et ce indépendamment d'une optimisation quasi sûre de l'impact environnemental

.2. Présentation générale de la smart technologie appliquée à l'éclairage public

Les innovations technologiques appliquées aux systèmes d'éclairage public ont donné naissance à l'éclairage vert ou l'éclairage intelligent (Smart lighting) [127]

Le smart éclairage est basé sur la mise à profit des technologies et des systèmes :

- De détection de présence et de mouvement;
- De dimming ;
- De gradation;
- De télégestion.

Le système d'éclairage intelligent (smart lighting) offre:

- L'intégration du concept de la ville intelligente (smart city) [128];
- La consommation rationnelle de l'énergie électrique par un contrôle automatique de la variation de puissance et de l'extinction;
- La gestion à distance et individualisée pour chaque luminaire du réseau;
- La facilitation de la maintenance et la garantie d'une durée de vie plus longue;
- La multifonctionnalité: éclairage, gestion du stationnement, vidéosurveillance, connexion, recharge...
- La minimisation des impacts environnementaux ;
- L'optimisation de la performance énergétique et la rentabilité économique.

Contrairement à l'éclairage classique qui consiste à laisser les luminaires fonctionnels à pleine puissance durant toutes les heures de la nuit (environ 4100 heures par année), le smart éclairage est un éclairage dynamique basé sur le principe stipulant qu'il faut éclairer au bon endroit, au bon moment, dans la bonne direction et avec la bonne intensité [129].

Le système smart éclairage consiste à assurer un fonctionnement dynamique des luminaires qui repose sur deux (02) éléments d'action :

1. Un fonctionnement en mode statique et à plein régime durant les heures de forte présence des usagers, et ;
2. Un fonctionnement en mode dynamique (dimmé) basé sur la variation de puissance pour le reste de la nuit, alternant :
 - Un fonctionnement à plein régime à la détection de présence (durant les heures d'une présence minimale des usagers);
 - L'extinction ou le fonctionnement avec une puissance d'éclairage réduite (ex : 10 à 30%) en l'absence des usagers.

Le fonctionnement en mode dynamique pourrait concerner plus de 50% du volume horaire annuel de la nuit qui est d'environ 4200 heures.

Autrement-dit, le système smart éclairage permet au luminaire (détecteur de présence), durant la plage horaire déterminé (de 22h00 à 06h00) de passer, au moment de la détection de la présence d'un usager, à plein régime et s'éteindre ou diminuer l'intensité d'éclairage en l'absence d'usagers, cela permet de créer, à travers la ligne ou le réseau de plusieurs luminaires, des bulles de lumière qui accompagnent l'utilisateur lors de son déplacement.

.3. Détection de présence et de mouvement (La bulle lumineuse) :

Au vue des progrès de la technologie, les systèmes dotés de la détection de mouvement auront la possibilité de déterminer également la vitesse de mouvement de l'objet détecté (véhicule, être humain...) et communiquent les informations aux composants électroniques de contrôle et de dimming pour l'adaptation de l'intensité lumineuse et la rapidité (le moment) de mise en fonctionnement des luminaires contigus en fonction de la nature et du besoin de l'objet en question (voir Fig. IV-27), ce mode de fonctionnement peut être paramétré de 22h00 à 06h00.

P_{min} : La puissance minimale (30% de la puissance maximale)

P_{piéton} : La puissance de fonctionnement lors de la présence d'un piéton ;

P_{auto} : La puissance de fonctionnement lors de la présence d'un véhicule

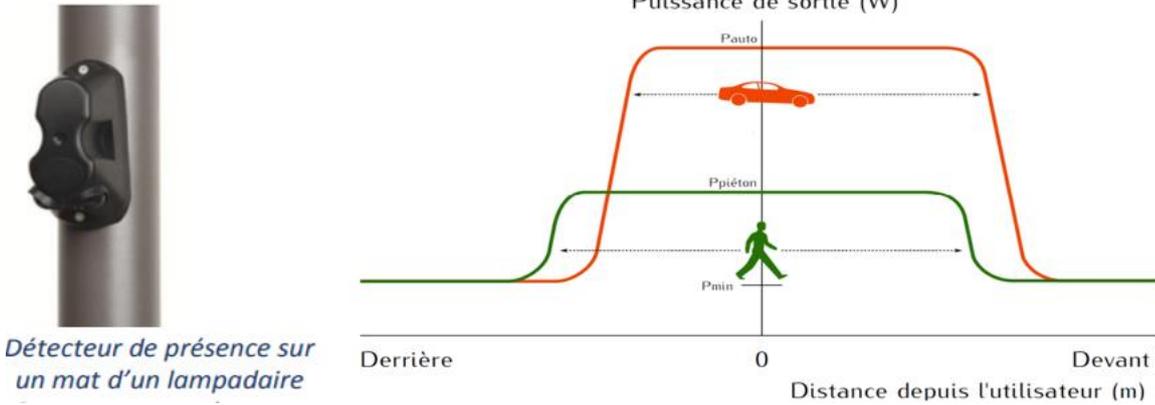


Fig. IV-27 : Principe de la bulle lumineuses et ses paramètres

Dans la pratique, le principe de fonctionnement du système d'éclairage intelligent sur une route ou une autoroute en dehors des heures de pointe (22h00 à 06h00) est repris sur le schéma ci-contre:

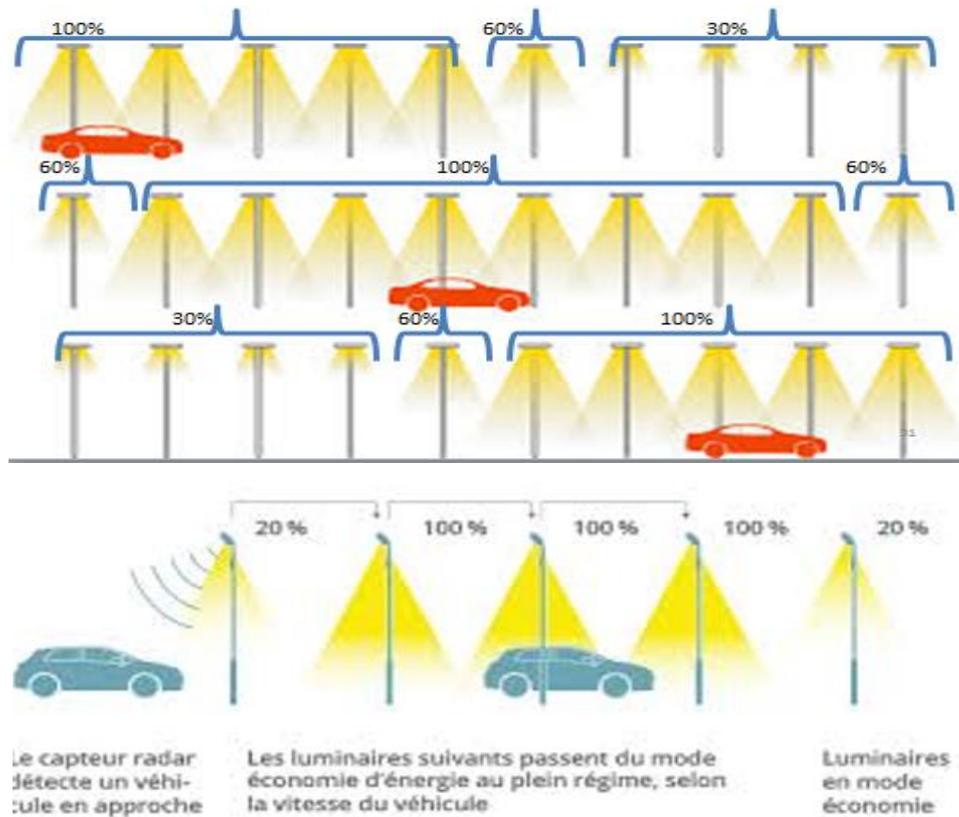


Fig. IV-27 bis : schéma de fonctionnement opérationnel du système d'éclairage intelligent sur une autoroute

Le système du smart éclairage pourrait être paramétré selon plusieurs options et le laisser varier sont fonctionnement de manière interactive, durant les heures creuses de la nuit (22h00-06h00), en basculant de la puissance réduite (mode économie d'énergie 20 à 30%) en absence de mouvement, vers une puissance de 60% à la détection d'un piéton ($P_{\text{piéton}}$) et vers une pleine puissance (Plein régime = 100%) du luminaire à la détection d'un véhicule ($P_{\text{autom.}}$) qui est l'option la plus adaptée en cas de présence d'un piéton et d'un véhicule en même temps.

Le fonctionnement de l'éclairage public dans un quartier résidentiel (Fig. IV-28) :

Les professionnels de l'éclairage public ont développé des systèmes suffisamment intelligents pour éclairer au bon endroit, au bon moment et avec une intensité adaptée à la vitesse de l'utilisateur.

Un piéton est détecté par le luminaire et par le micro-système installé dans le luminaire qui détecte à la fois sa présence et le type d'utilisateur en fonction de sa vitesse de déplacement. A ce moment-là, il va communiquer avec les autres luminaires et en fonction de la vitesse, ceux-ci vont s'éclairer petit à petit devant l'utilisateur et s'éteindre derrière lui. On va donc avoir une bulle lumineuse qui va suivre l'utilisateur à sa vitesse et qui va suivre ses mouvements. S'il s'arrête par exemple, la bulle d'éclairage va s'arrêter au-dessus de lui et quand il reprend sa marche, elle va reprendre son avancée par la mise en fonctionnement des luminaires auxquels se rapprochera.

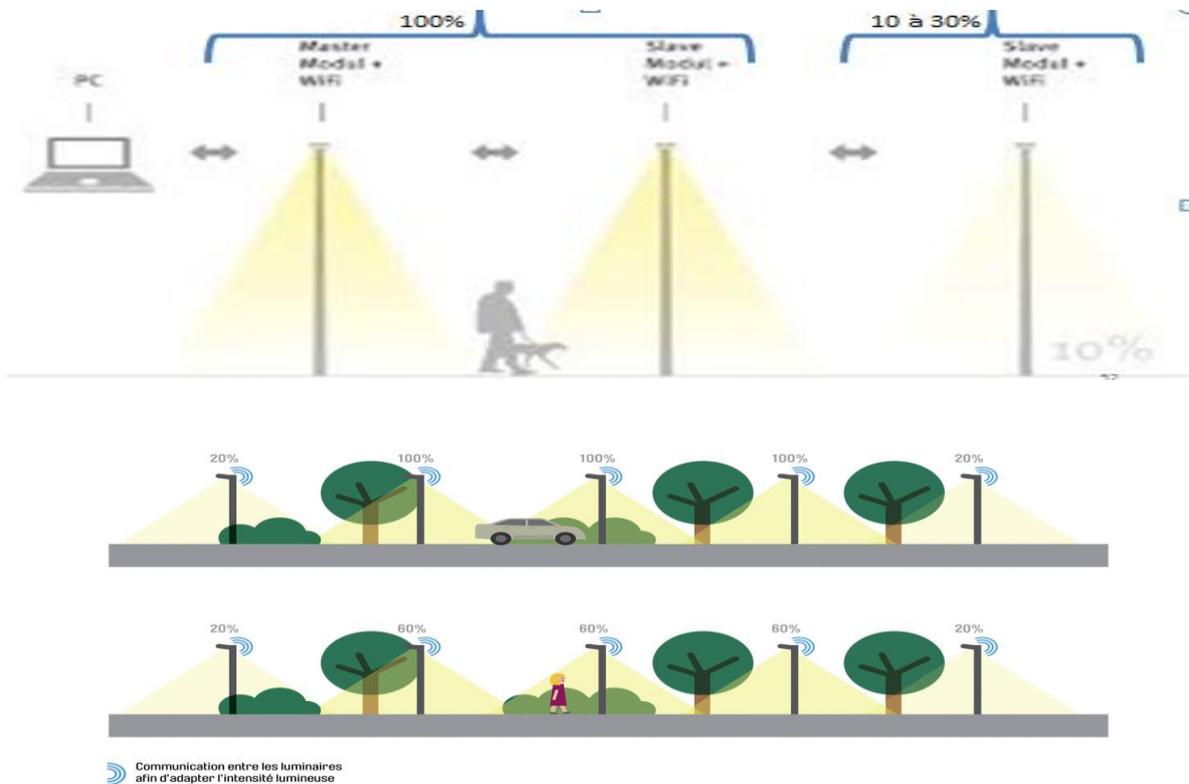


Fig. IV-28 : Paramétrage et schéma de fonctionnement opérationnel du système d'éclairage intelligent dans un quartier résidentiel

.4. Le dimming :

Il consiste à abaisser temporairement le flux lumineux des lampes et donc le niveau d'éclairage des routes, des rues et lieux publics à des fins environnementales, énergétiques et économiques.

Le dimming réalisé avec des ballasts électroniques peut alterner le fonctionnement du luminaire entre 100, 30 et 10% de la puissance installée en tenant compte, lors du paramétrage, du service voulu par les usagers et selon des plages horaires déterminées [130]. Les lampes LED s'accrochent parfaitement avec le dimming.

Le choix du mode de dimming dépend donc d'une décision concertée des pouvoirs publics, des communes, des groupes résidentiels et des gestionnaires des réseaux d'éclairage public.

En sus des performances environnementales et énergétiques, le dimming doit toujours garantir les buts de l'éclairage public à savoir la sécurité des usagers (automobilistes, cyclistes et piétons) et la mise en valeur des espaces et des sites.

Selon le type d'espace public, le dimming pourrait être envisagé en fonction de paramètres acceptés par les villes et communes (horaires fixes, présence de piétons, densité du trafic, conditions météorologiques, types de routes).

La réglementation et Les normes devraient évoluer pour spécifier les seuils tolérables en matière de diminution de l'intensité de l'éclairage des routes, des rues, des lieux publics et des sites divers tout en garantissant une sécurité suffisante aux usagers [131]. *Les recommandations de la norme NF EN 13201 ne traitent pas ces aspects*

Le dimming sur deux types de lampes fait ressortir des économies d'énergies de l'ordre de 20 à 30% comme illustre l'exemple repris sur le tableau IV-12.

Tab. IV-12 : Economie annuelle de la consommation d'énergie selon différentes valeurs et durées de dimming

Type de lampe	Valeur de dimming	Fonctionnement	Diminution de la consommation de l'énergie	Durée du dimming	Economie totale annuelle de la consommation d'électricité*
SHP** de 150 W	40%	60%	30%	50% de la nuit	15%
MIHP** de 150W	20%	80%	20%	50% de la nuit	10%

*En fonction de la situation de départ et de la manière dont le dimming est implémenté (période de dimming, niveau de dimming,...)

Les lampes LED dimmées offrent un meilleur rendement énergétique

***SHP : Lampe à sodium haute pression, MIHP: lampe à iodures métalliques avec brûleur céramique*

.4.1. Impact potentiel du dimming sur l'environnement :

Différentes études ont confirmé que la quantité de CO2 retenue (non émise dans l'atmosphère) est proportionnelle à la quantité d'énergie électrique économisée en installation d'éclairage public.

Comme illustré ci-dessous, le rapport entre ces deux variables corrélées dépend essentiellement au mix énergétique alimentant l'installation (l'exemple, repris sur le tableau IV-13, fait référence au bouquet énergétique belge (à dominance nucléaire), les économies d'énergie sur d'autres mix énergétique à ressources fossiles pourraient augmenter de manière conséquente la quantité de CO2 retenue).

Tab. IV-13 : Quantité en Kg de CO2 retenue pour 1MWh économisé en éclairage public alimenté par un bouquet électrique à dominance nucléaire (fig. IV-29)			
Pays	Bouquet énergétique	Economie sur la consommation de l'électricité destinée à l'éclairage public	Quantité de CO2 retenue (non rejetée dans l'atmosphère)*
Belgique	Cf. graphique	1MW/H = 1000 000 w/h	232 à 540 Kg
*Quantité de CO2 estimée sur la seule base de l'empreinte carbone associée à la production d'énergie.			
Il convient de tenir compte de la diminution des rejets de CO2 liée à l'entretien (déplacement du camion d'entretien, déchets...) et à l'usure des installations			
<p>Le diagramme circulaire illustre la répartition du bouquet énergétique belge. La majorité est constituée de nucléaire à 69%, suivie du gaz à 17%. Les autres sources sont le fuel (5%), le solaire (5%), le vent (3%), l'hydroélectricité (1%) et les autres sources (0%).</p>			
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Fig. IV-29 : Bouquet énergétique de référence (Belge) </div>			

.5. La télégestion

La télégestion permet de manière centralisée de :

- Commander la mise en fonctionnement, l'extinction ou le dimming des luminaires de manière unitaire ou groupée;

- Visualiser au travers d'une cartographie l'état de fonctionnement de l'ensemble des luminaires;
- Surveillance et contrôles des paramètres électriques et de fonctionnement.
- Alerte en cas de défaillance de l'installation.
- Planifier et contrôler le remplacement des lampes sur la base de leurs durée de vie et du nombre d'heures réel de fonctionnement ;
- Abaisser le niveau d'éclairage sur des routes ou des tronçons de routes en périodes de baisse de trafic, tout en laissant le système fonctionner à 100% au niveau des carrefours, des passages pour piétons et des zones à risques...

Ce concept permet d'éviter les tournées nocturnes d'inspection des luminaires et d'améliorer la qualité de fonctionnement du réseau par la possibilité d'une intervention plus rapide [132].

.5.1. Le système de gestion et de commande centralisée

Dans ce montage, toutes les informations sont transmises à un point central qui analyse la situation et renvoie des ordres de mise en fonctionnement des luminaires d'éclairage [133] conformément aux paramètres prédéterminés.

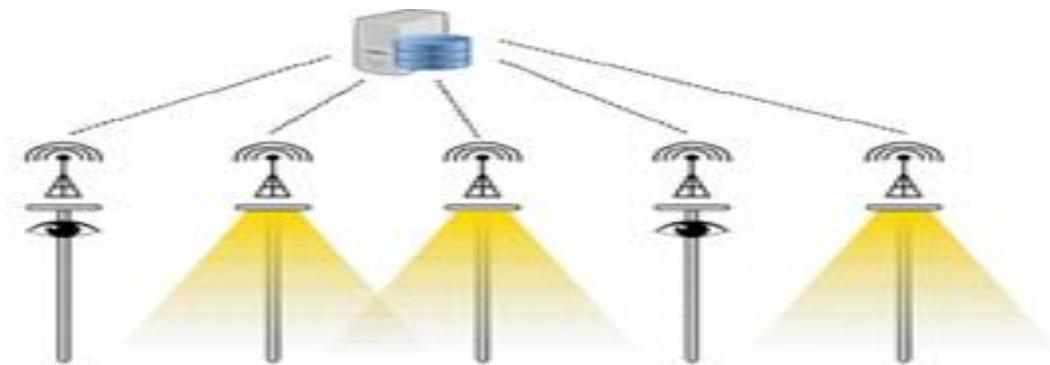


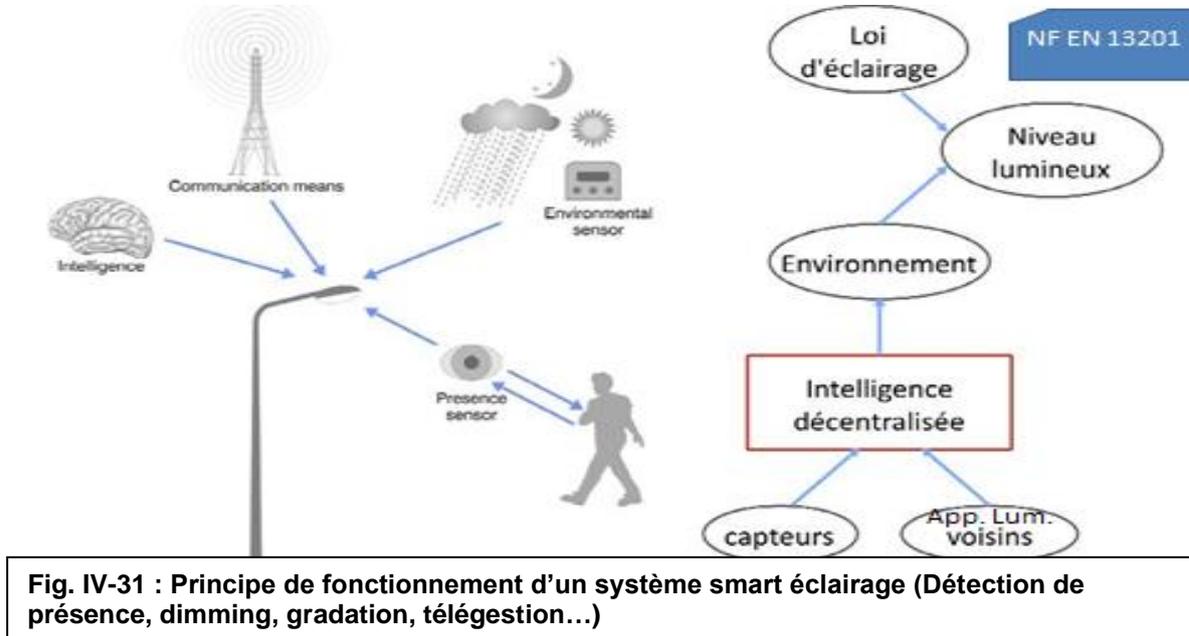
Fig. IV-30 : système centralisé de télégestion de l'éclairage public

.6. La reconnaissance et l'intégration de l'environnement lumineux ou la gradation:

la gradation avec des composants photosensibles permet de moduler l'apport en flux lumineux artificiel en fonction de l'éclairage existant du fait de la lumière naturelle (soleil, lune...) et du fait de luminaires attenants (du réseau ou externe au réseau) en fonctionnement. Autrement dit, les détecteurs de luminosité sont en interaction avec leur milieu environnant et prennent en compte tout apport luminosité (soleil, lune, projecteurs mitoyens) et en conséquence baissent automatiquement le flux des luminaires jusqu'à ce que cette combinaison donne l'éclairage

(ou le flux lumineux) exigé par les indications prédéterminées sur l'application de gestion (selon la norme EN 13201 par exemple) ce qui se traduit par des économies significatives d'énergie [134].

Ceci permet d'obtenir une optimisation de la performance énergétique et environnementale du



réseau.

Afin d'augmenter l'efficacité et la durabilité des installations d'éclairage public, des professionnels ont mis en place des systèmes de gestion informatisés (simulateurs) permettant un contrôle minutieux des paramètres de fonctionnement de l'installation d'éclairage public, tel celui décrit, ci-après.

.6.1. L'exemple du simulateur GEPPADI (Gestion des Parcs Publics d'Activités Durables et Intelligents)

Le simulateur GEPPADI est un outil d'aide à la conception et à la décision pour la réalisation d'une installation d'éclairage efficace, durable et intelligent. Prioritairement conçu pour soutenir les projets d'éclairage public dans les parcs d'activités économiques, ce simulateur peut également être utilisé pour tout autre projet d'éclairage routier.

Ce simulateur aide à la mise en place d'un éclairage public sensible aux besoins des usagers en éclairant au bon endroit, au bon moment, dans la bonne direction et avec la bonne intensité.

Le simulateur GEPPADI s'adresse particulièrement aux acteurs de l'éclairage public. Qu'ils soient bureaux d'études, entreprises spécialisées, gestionnaires de réseau ou services publics ou

Chapitre IV : ACV COMPARATIVE ENTRE LUMINAIRES CONVENTIONNELS ET LUMINAIRE A « LED »

communaux. Il offre l'opportunité de réaliser un premier dimensionnement de leur projet d'éclairage et d'en estimer les consommations énergétiques. Il permet ainsi d'évaluer l'économie annuelle qui peut être réalisée selon divers scénarios grâce à l'intégration du système de gestion intelligente tout en proposant un design optimal de l'installation d'éclairage.

Le simulateur GEPPADI permet à son utilisateur de réaliser un prédimensionnement de l'installation d'éclairage de son site, depuis la définition de l'implantation des candélabres en passant par la sélection des mats jusqu'à la fixation du flux lumineux nécessaire pour rencontrer les exigences photométriques requises par le site du projet [135].

L'exemple, ci-après montre que le déploiement du Système de Gestion d'Eclairage Public Durable et Intelligent (GEPPADI) après le renouvellement d'un réseau pilote doté de lampes LED permet de diminuer la consommation énergétique à 83% [136]:

Tab. IV-14 : Economie en consommation annuelle (4376 heures) d'énergie sur un tronçon d'un km d'éclairage public pour différents scénarios en KWh

N°	Type d'installation	Cons. Ann. en KWh
01	Installation Fonctionnant avec lampes classiques (SHP)	10870
02	Installation Fonctionnant avec modules LED	8814
03	Installation Fonctionnant avec lampes LED régie par un système de télégestion (GEPPADI)	1811

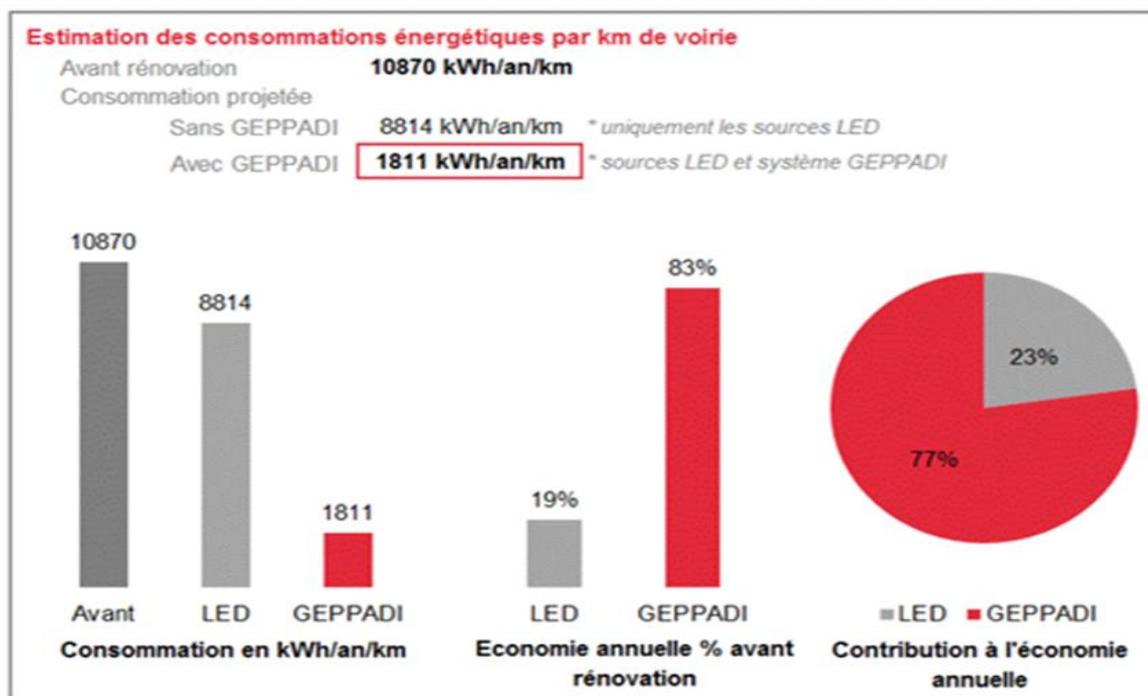


Fig. IV-32 : Evolution de l'économie en consommation annuelle (4376 heures) d'énergie sur un tronçon d'un km d'éclairage public pour différents scénarios en KWh

- **OPTIMISATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX, ENERGETIQUES ET ECONOMIQUES DES SYSTEMES D'ECLAIRAGE PUBLIC PAR L'INTRODUCTION DES ENERGIES RENOUVELABLES (à panneau photovoltaïque)**

L'introduction des énergies renouvelables dans les installations d'éclairage public particulièrement l'énergie photovoltaïque pour des régions à ensoleillement favorable s'avère une piste importante pour l'optimisation des impacts environnementaux et énergétiques.

De par ses caractéristiques géographiques et climatiques, l'Algérie dispose d'atout et de potentialités lui permettant de rendre les systèmes d'éclairage public plus performant sur le plan énergétique, environnemental et économique, par conséquent une durabilité incontestable.

L'étude de cas, ci-dessous, met en exergue les avantages d'une expérimentation pilote révélatrice d'un potentiel considérable en faveur des aspects environnementaux et énergétique.

.1. Etude de cas :

Le tableau IV-15, reprend les résultats d'une étude analytique relative à la mise en place, l'exploitation et la maintenance d'une installation d'éclairage public classique (avec câblage sous terrain) et celle d'éclairage public photovoltaïque (sans câblage).

Les deux (02) installations couvrent une route (autoroute) d'une longueur de 05 kilomètres, d'une largeur de 20 mètres équipée de 250 points lumineux. Dont la distance entre deux points lumineux est de quarante (40) mètres (125 luminaires de chaque côté). Puissance de fonctionnement pour un luminaire classique SHP (150 W)[137].

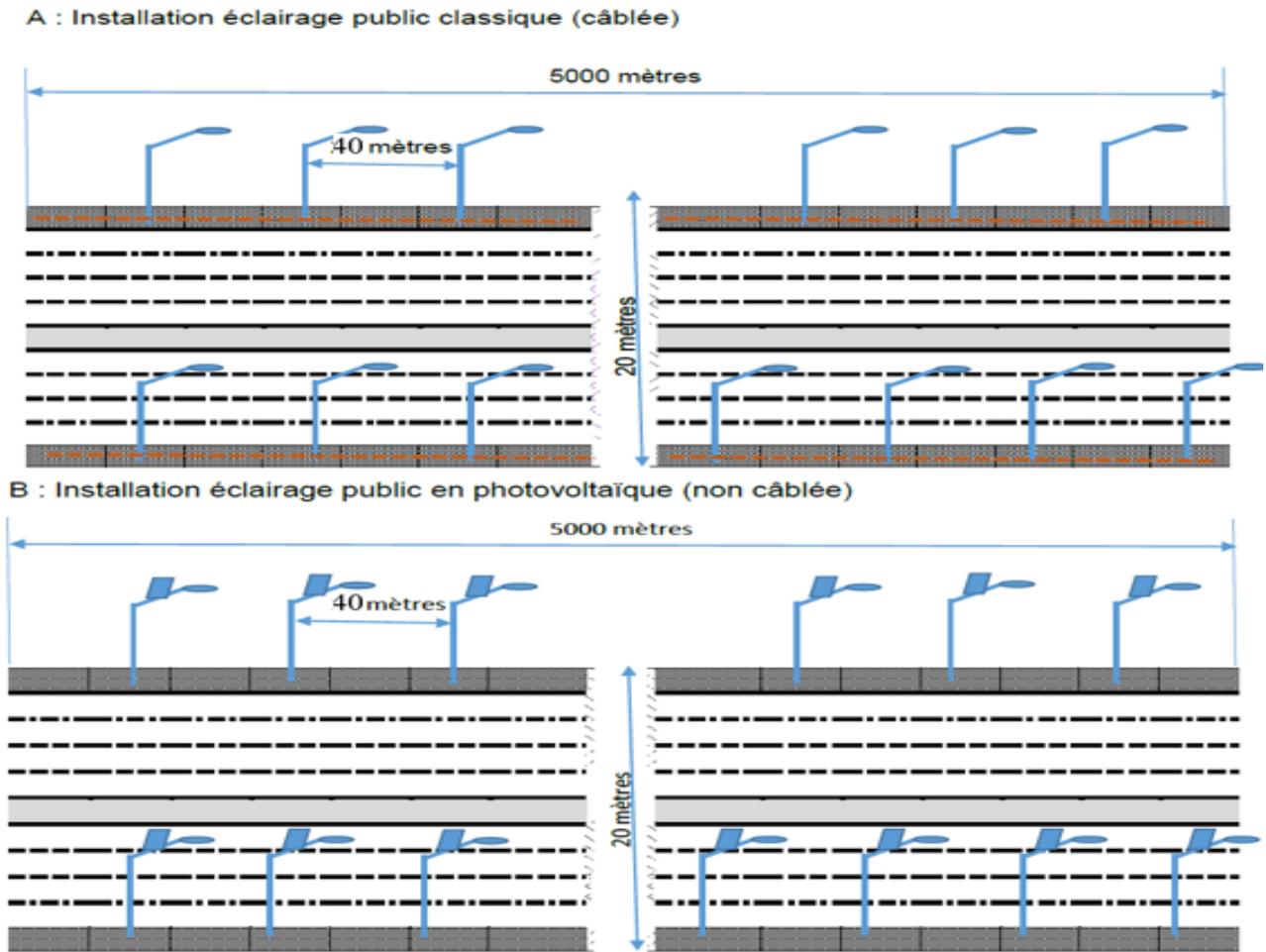


Fig. IV-33 : Simulation comparative des performances énergétiques et économiques de deux installations d'éclairage public

.1.1. coûts d'installation, d'utilisation et de maintenance des deux systèmes d'éclairage public (Installation A et B):

Le tableau IV-11 relate les différents rubriques de coûts de chaque installation sur toute la durée de vie.

Il ressort que le coût global (installation, exploitation et maintenance) de l'installation en photovoltaïque ne représente que 16.33% de celui d'une installation classique, par conséquent, la performance économique avoisine les 84% [138].

Tab IV-15 : Tableau comparatif des coûts d'installation, d'utilisation et de maintenance de deux systèmes d'éclairage public sur une durée de 20 ans

Rubrique	Eclairage public en photovoltaïque (Module LED)	Eclairage public classique (Alimentation réseau/lampe SHP)
Coût d'acquisition du	$120.000 \times 250 = 30.000.000$ DA	$70.000 \times 250 = 17.5000.000$ DA

Coût de l'installation (Pose/raccordement du système)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pose du système 4000*250=1.000.000 DA 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pose/raccordement du système 17.5000.000*15%=2.625.000DA
Coût de construction (travaux d'aménagement)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Socle de fixation : 7500*250 unités=1.875.000DA 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tranchées : 450 DA*40mètres*250unités=4.5000.000 DA ▪ Tube (gaine) plastique : 75DA*40mètres*250unités=750.000DA ▪ Câble : 450 DA*40 mètres*250=4.500.000DA ▪ Socle de fixation : 10.050*250=2.512.500 DA <p>TOTAL : 12.262.500DA</p>
Maintenance (sur 20ans)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Changement de batterie : 10.000DA *250unités *3fois=7.500.000DA ▪ Changement de lampe LED 15.000*2fois*250=7.500.000 DA <p>TOTAL : 15.000.000DA</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consommation d'électricité : 50DA*250*365jrs*20ans = 91.250.000DA ▪ Changement de lampes : 200DA*12fois*250=600.000DA <p>TOTAL: 91.850.000 DA</p>
Coût global sur 20 ans	47.875.000 DA	124.237.500 DA

Les performances environnementales et énergétiques d'une installation d'éclairage public en photovoltaïque sont reprises ci-dessous :

Tab. IV-16 : Récapitulation des avantages des lampadaires solaires photovoltaïques utilisés en éclairage public	
	<p>Simplicité d'installation (bloc béton + tiges de scellement).</p>
	<p>0 DA de tranchée.</p>
	<p>0 DA de câblage inter-supports.</p>
	<p>0 DA de frais de raccordement au réseau.</p>
	<p>0 DA de facturation (abonnement + consommation).</p>
	<p>100% d'autonomie d'alimentation.</p>
	<p>Energie renouvelable, propre et sans émission de CO₂.</p>
	<p>Entretien : remplacement de batterie tous les 05 ans + dépoussiérage des panneaux</p>
<p>Optimisation avec l'utilisation de luminaire LED</p>	

.2. Optimisation de la durée de fonctionnement de l'EP :

La durée de fonctionnement annuelle de l'éclairage public se situe entre 4000 et 4500 heures, Il faut donc adapter l'éclairage au besoin [139], exemple:

- Eclairer à plein régime en début de soirée (heures de pointe): jusqu'à 03 ou 04 heures après le coucher de soleil et à l'aube 02 ou 02heures et demie avant le lever du soleil;
- Abaisser la puissance d'éclairage à 30% sur le reste de la plage horaire.

Donc il en résulte pour une moyenne annuelle de 4100 heures:

- 1800 heures/an (44%) de fonctionnement en plein régime;
- 2300 heures/an (56%) de fonctionnement à puissance réduite (mode économie d'énergie = 30% de la puissance nominale)

Ce mode de fonctionnement alterné augmenterait considérablement la durée de vie des installations et des composants du réseau d'éclairage.

Outre les performances environnementales, énergétiques et économiques directes, il y aurait une nette diminution de la quantité des déchets.

Les luminaires d'éclairage public alimentés avec des panneaux photovoltaïques ou mixte (réseau électrique & panneaux photovoltaïque) peuvent abriter également des modules détecteur crépusculaire, de détection de présence et de composants électroniques de gradation. Dans ce cas le lampadaire est, commercialement, baptisé « le All in One ». il s'agit de luminaires à forte performance énergétique.

Il y a lieu de tenir compte lors de projets de rénovation ou des nouvelles installations de tenir compte :

- De l'éco-conception de l'installation dans le respect des réglementations et des normes et prendre en considération l'optimisation des performances environnementales et énergétiques;
- D'opter pour des équipements et des systèmes plus respectueux de l'environnement et ayant des performances énergétiques prouvées;
- De prévoir un système de contrôle de l'installation (télégestion, détection de présence, gradation, diming...);
- De retenir les options permettant de minimiser les nuisances sur les espèces faunistiques, floristiques et sur la santé humaine;

- D'opter pour un revêtement clair des voies et cheminement permettant de limiter la puissance d'éclairage et par conséquent des économies d'énergie;
- De prévoir la gestion écologique optimale des déchets en fin de vie des sources lumineuses et des autres composants des installations.

Principes à retenir pour un éco-éclairage:

- *N'éclairer que lorsque c'est réellement nécessaire;*
- *N'éclairer que là où c'est nécessaire;*
- *Adapter l'intensité d'éclairage aux besoins des usagers;*
- *Prendre en considération l'impact environnemental global de la lumière artificielle et des différents types de composants;*
- *Avoir une attention particulière dans les sites naturels.*

.3. Conclusion

Le passage aux nouvelles technologies et l'adoption du smart éclairage permettent une gestion dynamique des installations et l'optimisation des impacts environnementaux.

Les nouvelles technologie et l'avènement de l'internet des objets offrent des opportunités incontournables quant à la réduction de la consommation de l'énergie électrique, la diminution des divers impacts environnementaux et particulièrement dont les émissions de CO₂, des autres gaz à effet de serre et freiner l'épuisement des ressources.

L'introduction de l'énergie photovoltaïque favorisée par le taux d'ensoleillement en Algérie est un facteur majeur pour rendre les installations d'éclairage plus durable en optimisant leur impacts sur le plan environnementale, énergétique et économique.

Les performances offertes par les solutions, ci-dessus exposées, sont aptes à rendre la mise en place, le fonctionnement, la maintenance et la gestion de fin de vie de moins en moins polluants avec une optimisation de la consommation énergétique et les coûts liés aux différentes phases du cycle de vie des installations.

- **TRAITEMENT, RECYCLAGE ET ELIMINATION DES DECHETS DES LUMINAIRES EN FIN DE VIE**

.1. Introduction:

La longueur croissante des réseaux d'éclairage public et l'intensité de leur utilisation nécessitent continuellement des activités d'entretien et de maintenance (nettoyage, modification, remplacement de composants, rénovation...) qui à l'issue génèrent de plus en plus de pollution et de déchets dont le traitement pose une énorme problématique environnementale.

En outre, les impératifs des évolutions technologiques, de la modernisation conjuguées à la dégradation des installations pour diverses causes (climat, vandalisme, accidents...), imposent leur démantèlement et leur remplacement par de nouveaux équipements donnant lieu à divers types de déchets tels que des câbles usagers (cuivre + matières plastiques), des supports métalliques, des lampadaires comprenant des métaux divers (acier, aluminium, cuivre...) et du verre ainsi que des lampes contenant des métaux spéciaux, terres rares, verre, poudres et gaz toxiques..., des circuits électroniques...

L'éclairage intérieur produit à son tour des déchets similaires en quantités importantes qui rejoignent ceux de l'éclairage extérieur.



Fig. IV-34 : Volume et diversité des déchets de l'éclairage public

L'ensemble de ces déchets ne peuvent être entreposés que dans des déchèteries spéciales. Ils ne doivent pas être jetés avec les déchets banals ou dans les bennes à ferraille.

Cette situation a contraint les pouvoirs publics et les professionnels à créer un écosystème d'acteurs en charge d'assurer la collecte, le tri, le stockage et le traitement des déchets en question

(réutilisation, recyclage, incinération, enfouissement...) qui ont des impacts environnementaux divers et variés et ce en plus des contraintes techniques et financières.

La partie suivante vient en complément de l'ACV réalisée au titre de cette étude à l'effet de mettre en exergue les divers procédés employés pour le traitement en fin de vie des déchets d'éclairage public.

.2. Gestion des déchets, élimination et recyclage des composants des luminaires en fin de vie :

En général, le verre et les composants métalliques qui constituent 92 % du poids d'un luminaire d'éclairage extérieur réformé seront recyclés, le plastique sera recyclé et/ou incinéré, Les poudres luminescentes, terres rares et mercure sont neutralisés puis mis en centres de stockage, (les lampes LED ne nécessitent pas ce traitement) [140].

Concernant les supports métalliques d'éclairage public usagés, leur réemploi après récupération et tri pourrait être envisagé ou à défaut leur récupération et leur reprise peut être assurée par un ferrailleur agréé, pour un éventuel envoi en aciérie/fonderie. Les autres déchets de l'éclairage public (Ballast, Driver, Condensateur...) sont considérés comme des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE), leur recyclage et/ou élimination est effectué selon des procédés spéciaux et adaptés.

Dans beaucoup de pays, la réglementation prévoit que détenteurs doivent assurer ou d'en faire assurer le traitement et ou l'élimination des déchets en question dans des conditions conformes et optimales.

En ce sens que les pouvoirs publics devraient encourager l'émergence d'éco-organismes spécialisés dans la collecte et le recyclage de cette catégorie de déchets (composants de luminaires).

Un fort investissement dans ces filières favorise la massification de la collecte ce qui permet d'assurer un taux élevé de recyclage de matières d'où la rentabilité économique qui serait un levier pour la protection de l'environnement.

.3. Traitement des déchets de fin de vie d'un luminaire :

Plusieurs parties des luminaires d'éclairage public sont considérés, au sens de la réglementation, comme des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques professionnels (DEEE pro). Ces déchets relèvent d'une réglementation spécifique stipulant leur dépollution avant d'être recyclés. Ils ne doivent pas être jetés avec les déchets banals ou dans les bennes à ferraille.

Selon l'article R543-172 et suivants du Code de l'environnement français, et à l'exception du bloc métallique du luminaire d'éclairage public (Refroidisseur, couvercle transformateur, emboîtement des verres, vis de fixation et d'assemblage), les autres composants du luminaire rentrent dans la catégorie des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques - DEEE (D3E) (en anglais : Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE). Le même article du code, ci-dessus cité, définit les Equipements Electriques et Electroniques (EEE) comme « les équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1000 volts en courant alternatif et 1500 volts en courant continu » .

En outre la directive 2002/96/CE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques précise dans son article 4 que les producteurs doivent mener des efforts conséquents dans le domaine de l'éco-conception afin « *d'encourager la valorisation des déchets en vue de **réduire la quantité de déchets à éliminer et d'économiser les ressources naturelles*** ». La réutilisation, le recyclage et la valorisation des déchets doivent être privilégiés en tenant compte des effets environnementaux et économiques [141]

La réglementation impose de mettre en place la collecte des DEEE et leur recyclage.

La figure IV-40 illustre le processus énergétique de traitement des déchets issus des petits appareils électriques et électroniques dont les transformateurs et les autres composants électroniques des luminaires d'éclairage public qui en font partie.

Le taux moyen de recyclage des DEEE s'est élevé, en France, en 2021 à 77%. Des matériaux recyclés comme le cuivre, l'aluminium, les cartes électroniques, le verre ou les plastiques par exemple trouvent de nouveaux débouchés notamment dans l'industrie automobile ou la construction

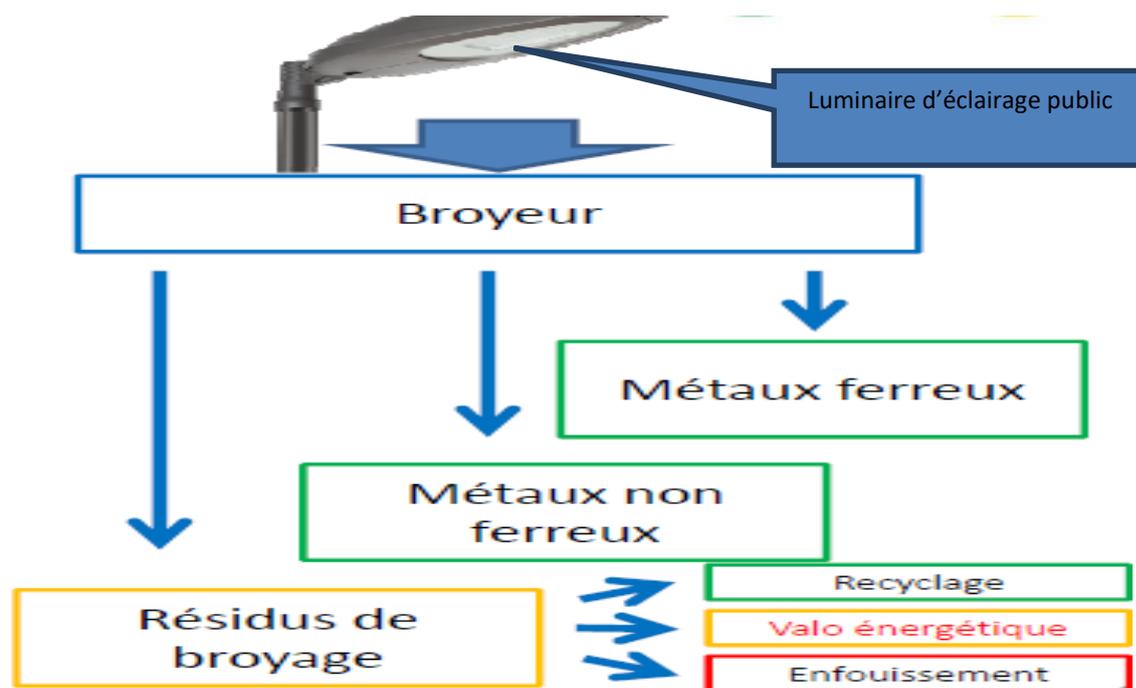


Fig. IV-35: Organigramme du processus général de traitement des DEEE

Les données résultant du démantèlement d'un luminaire LED en fin de vie réalisé à l'occasion de cette étude sont présentées sur le tableau IV-17.

Tab. IV-17 : Quantification des déchets de démantèlement du luminaire : 200 w NREP 43L (NOUR ECLAIRAGE)

Composant	Matériaux	Poids (g)	Taux (%)
Boitier/Echangeur thermique (Refroidisseur)	Fer	4100	69.63
Couvercle transformateur			
Emboitement des verres			
Vis de fixation			
Vis d'assemblage			
Fils électriques	Cuivre	26	0.44
Support/Base de LED (Porte LED)	Aluminium	98	1.66
Enveloppe de driver LED			
Réflecteur			
Circuit transformateurs/Driver LED et autres composants électroniques	Cuivre et autres matériaux en petites quantités	54 *4 = 216	3.67
Gaines	Matières plastiques	320	5.43
Enrobage du transformateur			
Joint d'étanchéité	Verre	283x4= 1128	19.16
Verre de diffusion des LED (optique/lentille-réflecteur)			
Total	/	5888	100.00

Le démantèlement d'un luminaire à Sodium Haute Pression utilisé en éclairage public a produit des déchets dans des proportions similaires.

Il ressort du tableau que :

- les déchets métalliques d'un luminaire constituent 72 % du poids sont souvent recyclés au niveau des usines spécialisées (assière/fonderie), certaines parties pourraient être réutilisées en l'état ou rénovées selon un processus simplifié.
- Le déchets en verre d'un luminaire constituent 20 % du poids sont souvent soit réutilisés, soit broyés et recyclés dans la composition d'autres produits pour être utilisés de nouveau.

Des études ont montré qu'une (01) tonne de verre recyclé après broyage (calcin) permet d'économiser 700 kg de sable, 150 kg de soude ou potasse, et 100 kg de calcaire et qu'une (01) tonne de calcin réutilisée permet d'éviter le rejet de 500 kg de CO₂ dans l'atmosphère.

- Le plastique (5,43%) sera recyclé et/ou incinéré (voir IV-36).
- Les lampes sont recyclables à plus de 90% de leurs poids (Fig IV-36);
- Les poudres luminescentes, terres rares et mercure sont neutralisés puis mis en centres de stockage (lampes circuits LED (COB) ne nécessite pas ce type de traitement) [140].
- Les déchets issus des composants électroniques du driver LED seront traités conformément aux processus présentés à la section 6 de cette étude.

Dans la section suivante de cette étude, sont présentés les processus de traitement et de recyclage des déchets issus des différents composants d'un luminaire notamment, les lampes, transformateurs/Ballast et autres composants électroniques :

.3.1. Traitement des lampes (Circuit LED et autres lampes):

Les schéma et processus, ci-après, illustrent les étapes techniques de traitement, séparation des composants, dépollution et recyclage des différents types de lampes d'éclairage.



Fig. IV-36 : Devenir du recyclage de plus de 90% du poids de la lampe

Ci-dessous, sont présentées, les principales étapes de traitement des luminaires en fin de vie.

Étape 1 : Prétraitement manuel



Retrait des lampes, des câbles, des globes en verre ...
Démontage des armoires et gros équipements

Étape 2 : Désintégration des équipements



Étape 3 : Dépollution manuelle post-broyage



Étape 4 : Séparation des fractions

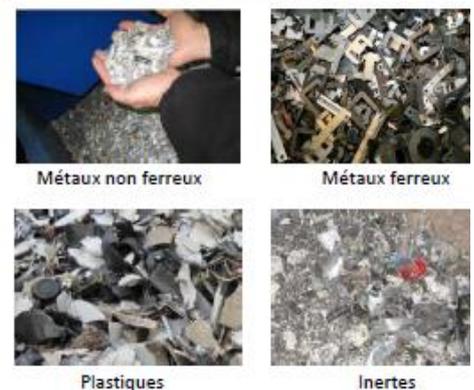


Fig. IV-37: Processus de traitement des différents types de luminaires d'éclairage public et leurs accessoires

Des études estiment que pour une lampe dont 87.7% de matières sont recyclées résultera l'économie d'extraction d'environ 160 g de matières premières brutes économisées et d'environ 1 kg de CO2 non émis.

Les lampes à circuit de LED qui arrivent en fin de vie sont actuellement traitées de la même manière avec les ampoules fluo-compactes. La recherche vise à développer des procédés maximisant le recyclage et l'extraction des métaux précieux et stratégiques qu'elles contiennent tel que or, argent, cuivre, etc.

.3.1.1. Déchargement

A l'issue de la collecte, les lampes sont déchargées avec précaution.

.3.1.2. Stockage

Les lampes sont stockées dans l'attente de leur traitement. le stockage est organisé afin d'alimenter régulièrement la ligne et d'absorber les volumes à traiter. Les lampes passent à l'étape de tri manuel via un dispositif de chargement automatique.

.3.1.3. Tri manuel

Les lampes font l'objet d'un tri par les opérateurs avant d'être broyées. Cela permet de retirer les indésirables (emballages, autres DEEE Ménagers, piles...) qui sont ensuite envoyés vers les filières de traitement adéquates. La zone de tri bénéficie d'un système de renouvellement d'air pour protéger les opérateurs.

.3.1.4. Broyage et captation du mercure par charbon actif

Les lampes passent (CMH, SHP...) dans une installation qui les broie sous atmosphère confinée. Ce système de confinement permet de capter et d'extraire le mercure gazeux des lampes à l'aide de filtres à charbon actif.

.3.1.5. Aspiration des poudres et captation du mercure par charbon actif

Les poudres fluorescentes mercurisées contenues dans les lampes sont aspirées et le mercure gazeux résiduel est capté à l'aide de filtres à charbon actif soufré placés dans le système d'aspiration de l'air des installations qui seront, ultérieurement, incinérés et stabilisés.

.3.1.6. Criblage

Un crible permet de séparer différents éléments en fonction de la granulométrie. Le verre, à la granulométrie plus faible, est ainsi séparé des autres fractions.

.3.1.7. Séparation des métaux ferreux (Overband)

Un Overband, ou aimant permanent, est placé au-dessus d'un convoyeur, formant un tunnel avec lui, permet d'entraîner hors de la ligne de transport les particules ferreuses à éliminer. Sous l'effet de l'attraction magnétique, les corps ferreux sont attirés et séparés du vrac de déchets. Quand l'attraction cesse, ils retombent dans le contenant choisi (trémie, benne, etc.) sur un autre tapis de convoyage tandis que les matières non ferreuses poursuivent leur cheminement sur le premier tapis. Ceci permet d'extraire entièrement les fractions magnétiques (métaux ferreux).

.3.1.8. Séparation des métaux non ferreux

Sous l'effet d'un dispositif à courants de Foucault, les métaux non ferreux sont séparés à l'aide de champs magnétiques.

Toutes les fractions extraites bénéficient de traitements spécifiques ultérieurs suivant trois possibilités:

- recyclage pour produire de nouvelles matières (solution privilégiée) ;
- valorisation énergétique ou valorisation matière ;
- élimination en respect des réglementations.

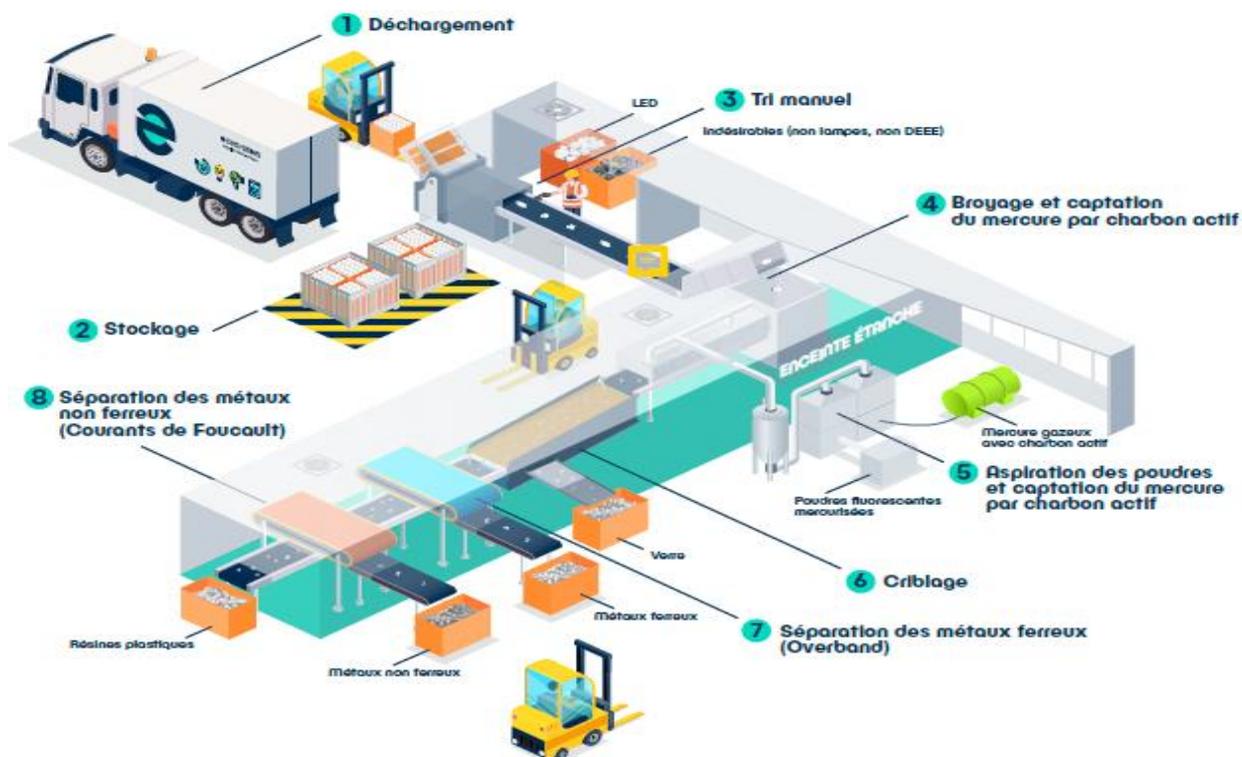


Fig. IV-38 : Traitement des lampes en fin de vie

.3.2. Traitement des composants électroniques :

les composants électroniques tels que ceux d'un luminaire qui sont essentiellement les éléments du transformateur, ballast électronique (driver pour le LED), tel qu'illustré dans la fig IV-39.



Fig. IV-39 : Composants électroniques d'un luminaire LED 200 Wat – quatre (04) Drivers en recto verso (après enlèvement de l'enrobage)

.3.2.1. Déchargement

A l'issue de l'opération de collecte, les équipements sont déchargés dans des zones dédiées et sécurisées.

.3.2.2. Stockage

Les équipements sont stockés dans l'attente de leur traitement. Le stockage est organisé afin d'alimenter régulièrement la ligne et d'absorber les volumes à traiter.

.3.2.3. Pré-tri manuel et dépollution

Un pré-tri manuel permet de prélever diverses substances et composants réglementés (piles, batteries ...) qui bénéficieront de traitements spécifiques et d'extraire différentes fractions (câbles, indésirables ...) qui ne nécessitent pas ou ne doivent pas rentrer dans le désintégrateur.

.3.2.4. Désintégrateur (ouverture mécanique)

Les équipements passent dans un désintégrateur qui ouvre et décompose les équipements en plusieurs fragments afin de faciliter l'accès et la libération de certains composants situés à l'intérieur des équipements.

.3.2.5. Tri manuel

Un tri manuel permet d'extraire différentes fractions (polluants, câbles, moteurs et bobines ...) qui bénéficieront de traitements spécifiques ou qui ne doivent pas rentrer dans l'installation de broyage.

.3.2.6. Broyage

Les fractions restantes passent dans un broyeur qui déchiquète les équipements en petites fractions plus faciles à trier par les installations suivantes.

.3.2.7. Séparation des métaux ferreux (Overband)

Un Overband, ou aimant permanent, est placé au-dessus d'un convoyeur et permet d'entraîner hors de la ligne de transport les particules ferreuses à éliminer. Sous l'effet de l'attraction magnétique, les corps ferreux sont attirés et séparés du vrac de déchets. Quand l'attraction cesse, ils retombent dans le contenant choisi (trémie, benne, etc.) ou sur un autre tapis de convoyage tandis que les matières non ferreuses poursuivent leur cheminement sur le premier tapis. Ceci permet d'extraire entièrement les fractions magnétiques (métaux ferreux).

.3.2.8. Tri manuel des bobines

Le tri manuel des bobines est effectué par les opérateurs qui séparent les moteurs et les bobines provenant des divers types d'équipements électriques et électroniques des autres fractions de métaux ferreux.

.3.2.9. Tris spécifiques

Différentes technologies peuvent être combinées pour séparer le reste des fractions en familles plus homogènes :

- Courants de Foucault : séparation des métaux non ferreux à l'aide de champs magnétiques.
- Tri densimétrique : à l'aide par exemple d'une grille vibrante qui sépare les fractions légères et les fractions lourdes ou encore par flottaison qui est une méthode de séparation en phase liquide se basant sur la densité des fractions à trier.
- Tri optique : détection via des instruments d'optique (infrarouge, rayons X...) des différents types de fractions comme le plastique, les cartes électroniques, les fils...

Toutes les fractions extraites bénéficient de traitements spécifiques ultérieurs suivant trois possibilités:

- recyclage pour produire de nouvelles matières (solution privilégiée),
- valorisation énergétique ou valorisation matière,

- élimination en respect des réglementations.

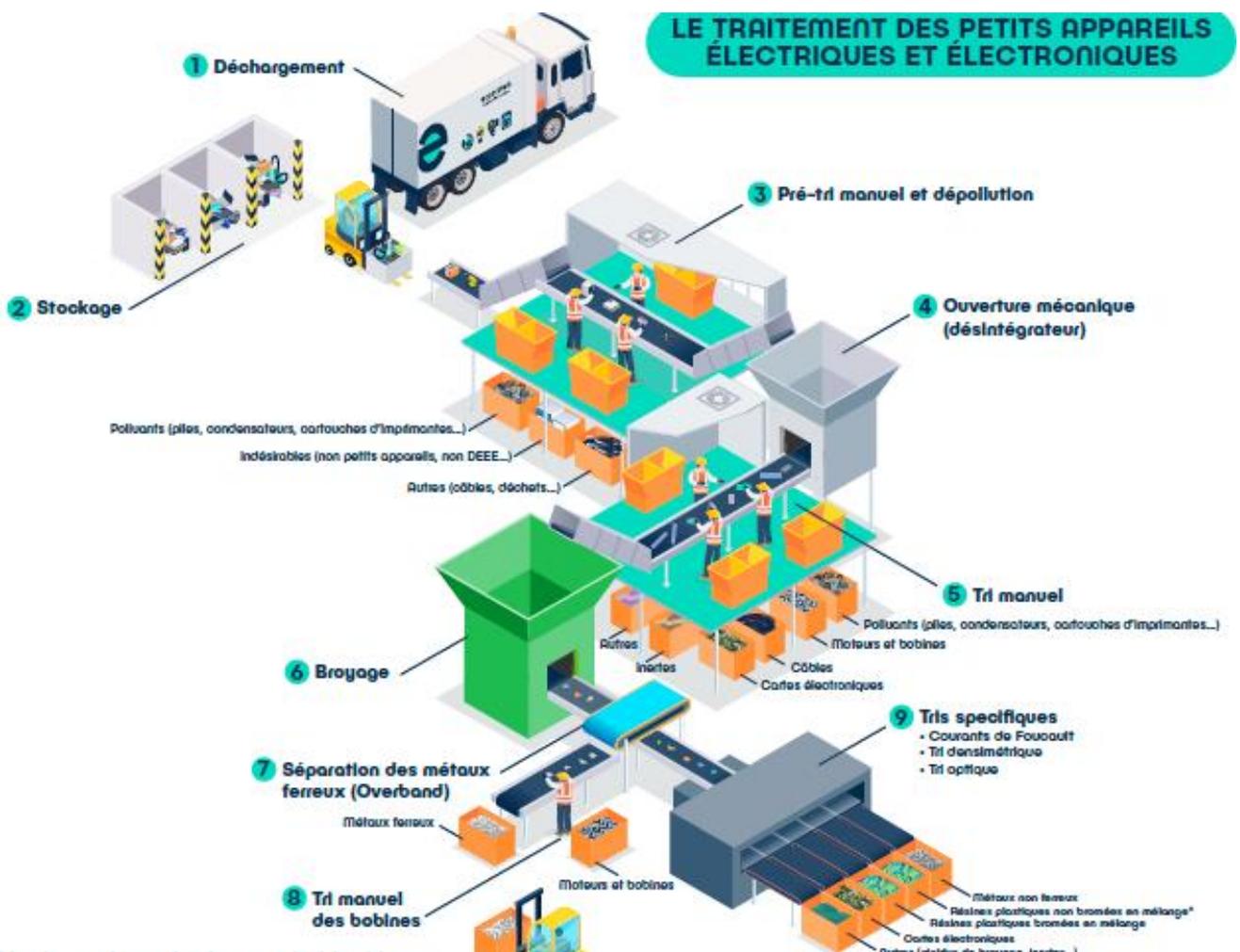


Fig. IV-40 : Traitement des petits appareils électriques et électroniques dont les ballast électroniques et les driver de luminaires LED

.3.3. Le recyclage du plastique des DEEE

La section, ci-dessous, développe le processus de traitement de fin de vie des plastiques des déchets d'équipements électriques et électroniques dont ceux des luminaires et leurs composants, en vue de leur intégration dans de nouveaux produits, il s'agit d'un traitement spécifique des résines plastiques en mélange.

.3.3.1. Déchargement

Les plastiques sont déchargés dans des zones dédiées.

.3.3.2. Stockage

Les plastiques sont stockés dans l'attente de leur traitement.

.3.3.3. Alimentation de la ligne

La ligne est alimentée en fonction des volumes à traiter.

.3.3.4. Séparation des métaux et autres indésirables résiduels

Différentes solutions techniques (Overband, courants de Foucault, flottaison...) permettent d'extraire les métaux ferreux et non ferreux et autres indésirables résiduels afin d'obtenir une fraction plastique pure.

.3.3.5. Broyage

Les plastiques sont ensuite broyés pour être réduits en fractions de tailles adaptées aux solutions de tri en aval.

.3.3.6. Lavage

Les plastiques sont ensuite lavées pour retirer les derniers résidus (poussières, étiquettes, mousses...).

.3.3.7. Tri par type de résine

Les différentes technologies ci-dessous peuvent être combinées pour trier les plastiques en familles de résines :

- Tri optique : détection via des instruments d'optique (infrarouge, rayons X...) des différents types de plastique.

- Triboélectricité : séparation combinant un chargement électrostatique superficiel des fractions par frottement et un champ électrique de forte puissance.
- Flottaison : séparation des fractions basée sur la différence de la masse volumique des fractions par rapport à la masse volumique du liquide dans lequel elles sont submergées. Les fractions qui flottent ont une masse volumique inférieure à celle du liquide.

.3.3.8. Régénération : extrusion et granulation

Les plastiques lavés et triés par résine sont traités par lot de résines similaires. Ces lots sont homogénéisés, fondus, extrudés en fil puis découpés pour produire de petits granulés (compounds) qui seront ensuite utilisés dans diverses applications de plasturgie. A cette étape, il est possible d'ajouter divers additifs pour conférer aux granulés recyclés certaines caractéristiques techniques (souplesse/rigidité) ou visuelles (colorants) nécessaires à leurs futures applications.

.3.3.9. Recyclage plastiques en mélange

Ces résines en mélange seront à leur tour traitées et séparées par d'autres acteurs. Certaines résines peuvent parfois être recyclées ensemble (dans certains cas par ajout de compatibilisant) pour produire des plastiques recyclés aux caractéristiques techniques souvent faibles.

.3.3.10. Incinération avec valorisation énergétique

L'incinération avec récupération d'énergie consiste à transformer, en vapeur sous pression, la chaleur dégagée par la combustion des déchets, vapeur qui est ensuite détendue dans un turboalternateur produisant de l'électricité et, lorsque cela est possible, utilisée pour alimenter un réseau de chaleur urbain ou des industriels avoisinants. Le statut d'opération de valorisation énergétique n'est accordé qu'aux incinérateurs atteignant une performance énergétique minimum. Par exemple, sur 127 installations d'incinération de déchets ménagers en France, 97% en produisent de l'énergie.

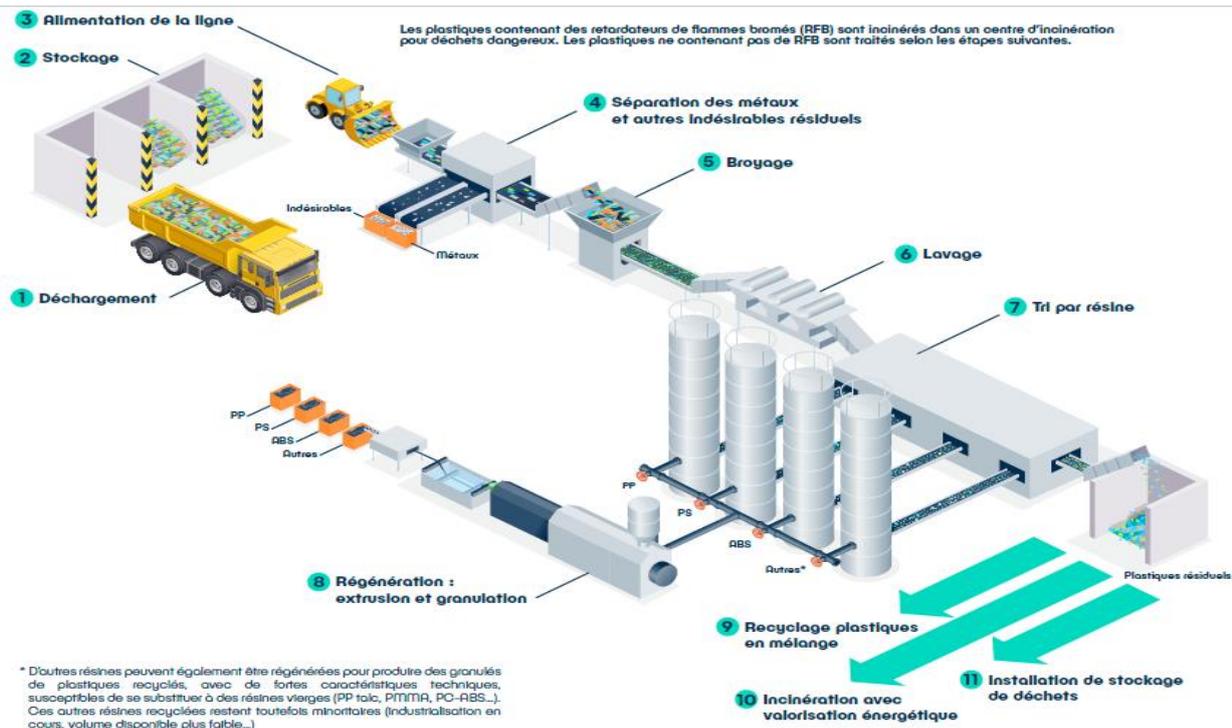


Fig. IV-41 : traitement de fin de vie des plastiques des équipements électriques dont ceux des luminaires

.3.4. Installation de stockage de déchets ultimes

Toutes les fractions extraites bénéficient de traitements spécifiques ultérieurs suivant trois possibilités:

- recyclage pour produire de nouvelles matières (solution privilégiée) ;
- valorisation énergétique ou valorisation matière ;
- élimination en respect des réglementations.

.3.4.1. Captage des vapeurs toxiques des lampes :

La plus grande partie du mercure qui s'est échappée lors du broyage des ampoules est piégée par des filtres à charbon actif soufré placés dans le système d'aspiration de l'air des installations.

Les filtres de charbon actif saturés sont remplacés par des nouveaux.

Les filtres à charbons actifs usagés et saturés de mercure seront destinés à l'incinération-stabilisation.

.3.4.2. L'incinération-Stabilisation :

Les filtres à charbons actifs avec d'autres déchets dangereux sont brûlés dans un four dédié, les fumées contenant le mercure sont lavées.

Les eaux de lavage sont traitées et, grâce à un additif (de floculation-coagulation), le mercure est piégé dans les boues de ce lavage. Les boues sont ensuite pressées et solidifiées sous une forme que

l'on appelle «gâteau de filtration». Le mercure ainsi stabilisé ne peut s'échapper dans l'atmosphère ou dans les sols.

Le mercure stabilisé est envoyé dans des Installations de Stockage des Déchets Dangereux par enfouissement (ISDD), elles-mêmes sécurisées pour éviter toute dispersion des polluants dans le sol.

.3.4.3. La stabilisation-solidification-enfouissement :

Les filtres à charbon actif peuvent être, sans incinération, directement envoyés en ISDD après stabilisation/solidification grâce à des liants tels que de la chaux ou du ciment.

Les poudres fluorescentes (récupérées par soufflage) qui contiennent une petite partie du mercure sont elles aussi acheminées vers des ISDD après démercurisation puis stabilisation et solidification.

.4. Conclusion

L'émergence de nouvelles technologies adaptables aux systèmes d'éclairage public permet d'obtenir de meilleures performances et de rendre durable ce dernier. L'ACV comparative présentée dans cette étude a montré des scores intéressants en matière de performances environnementales et énergétiques des installations d'éclairage public dotées de luminaires à LED.

L'analyse du cycle de vie des nouveaux systèmes d'éclairage public comparativement à celui des installations conventionnelles (avec lampes CMH ou SHP), fait ressortir une réduction considérable du potentiel de pollution au niveau des phases de mise en place, d'exploitation, de maintenance ainsi que la réduction des déchets de fin de vie.

Le déploiement d'installations dotées de technologies innovantes devra être accompagné par la promulgation de nouvelles dispositions réglementaires et normatives à l'effet de cadrer et uniformiser la conception, la mise en place et la gestion de fin de vie des installations en question.

Les procédés de traitement des déchets de l'éclairage public présentés ci-dessus montre un potentiel de recyclage des différents composants des installations d'éclairage public dépassant les 90% de la quantité globale des déchets.

L'éco-conception et l'examen permanent des phases du cycle de vie des installations d'éclairage public basées sur les nouvelles technologies permettra de réduire significativement leurs nuisances et leur pollution et optimisera continuellement leur durabilité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les multiples études sur des expériences de remplacement de luminaires d'éclairage public à lampes conventionnelles (Incandescence classique, Lampe Fluorescente, Lampe à haute pression à vapeur mercure, Iodure métallique, Sodium basse pression, Sodium haute pression) par des luminaires à LED ont donné des résultats, en terme consommation d'énergie, en faveur de ces derniers et ce pour des niveaux d'efficacité lumineuse et de rendu des couleurs par wat consommé équivalents ou même meilleurs pour le LED. En ce sens qu'un luminaire LED de 200 w fournit un flux lumineux (luminosité) meilleur qu'un luminaire à lampe en sodium haute pression (SHP) de 250 w et nettement plus fort qu'un luminaire en iodure métallique. Certains spécialistes préconisent, déjà, de se contenter d'un LED de 150 w pour le remplacement d'un SHP à 250 w, les gains en consommation d'électricité, dans ce cas, pourront atteindre les 50%, cette baisse de consommation est proportionnelle à l'impact économique et environnemental.

L'avantage en performance énergétique conjuguée à la longévité des LED (le double du SHP) nous fait conclure que, sur l'ensemble du parc national estimé à des millions de luminaires, les répercussions sur efficacité énergétique et financière sont considérables.

Les premiers résultats qui se sont dégagés de cette étude comparative nous interpellent pour mettre en évidence certains impacts environnementaux potentiels liés à la production de l'énergie engendrée par la surconsommation des lampes conventionnelles. Nous citons, à titre non exhaustive, l'empreinte carbone (en g de CO₂ émis par KWh) et l'empreinte métal (en Kg/KWh) engendrées quel qu'en soit le processus de génération de l'électricité. Une estimation faite par l'ADEME, abstraction faite de fin de vie, stipule qu'un seul luminaire conventionnel émet 485 Kg de CO₂ durant une durée de vie de vingt (20) ans dont la principale cause est la consommation d'énergie (à 85%). L'extrapolation de ces indicateurs à une échelle plus vaste permet de mettre en évidence l'ampleur de cette charge environnementale causée par ce manque d'efficacité sur les systèmes d'éclairage public.

Sur des dizaines de publications scientifiques exploitées, il ressort que la mise en place de nouvelles technologies d'éclairage public a permis, en plus d'une optimisation économique, la diminution de la consommation ce qui nous a permis de déduire dans un premier temps et à titre de prédiction que la performance environnementale aura une tendance similaire. Une prédiction nécessitant d'être étayé par une ACV comparative entre l'éclairage par des technologies conventionnelles (SHP et CMH) et celui adoptant la technologie au LED.

Conclusion générale

En dépit d'une charge environnementale de la phase production plus grave pour les LED comparativement aux technologies traditionnelles, l'exploitation d'un large éventail de bibliographie présentant des études d'ACV se limitant à comparer les lampes traditionnelles et les LED sans tenir compte du contexte de leur utilisation atteste d'un score environnemental global (agrégé) de 28% pour la LED contre 34% pour les lampes en Céramic Métal Halide (Halogénure métallique céramique CMH/HMC) et 100% pour les lampes à incandescence, force est de constater que ces conclusions ont motivé, depuis une douzaine d'années, leur interdiction d'utilisation au niveau de l'Union Européenne. Elles finiront à être retirés de tout usage à l'échelle mondiale.

L'ACV comparative des luminaires SHP et LED menée, au titre de cette étude, a utilisé des données quantitatives et expérimentales de qualité obtenues par démantèlement, enquêtes auprès de spécialistes et des entretiens avec les professionnels du domaine appuyés par l'exploration des bibliographies scientifiques s'appuyant sur des bases de données reconnues pour leur robustesse.

Les indicateurs agrégés montrent qu'au plan du cycle de vie global, le luminaire LED présente plus d'avantages que celui à base de SHP (364 points contre 433 points), toutefois, pour la phase de production des deux luminaires, les scores s'inversent, à savoir : 50,3 points pour le LED contre 14 points pour le luminaire SHP.

L'approfondissement de l'analyse avec des modèles établis selon les méthodes Eco-indicateur (EI99) et CML et ciblant les composants de chaque luminaire a montré que dans la fabrication du luminaire SHP, le couvercle vient en 1^{ère} position en terme d'impacts avec un score de 63% de son impact global, la production du ballast électronique porte un indicateur agrégé de charge environnementale sensiblement élevé représentant 21% du luminaire (malgré son volume et son poids limité), son impact partiel le plus élevé se situe au niveau de la catégorie intermédiaire « dégradation de la couche d'ozone » (ODP) allant à plus de 60%.

L'impact global de la phase de fabrication du LED revient essentiellement au refroidisseur qui enregistre 89% de l'impact global et en 2^{ème} position la production du pilote de LED (Driver) pesant ainsi 7%, notamment en ce qui concerne son potentiel de création de l'ozone photochimique.

L'étape de fabrication est la seule phase du cycle de vie qui est en faveur du luminaire SHP et qui au regard de l'évolution rapide des processus industriels de production du LED ne pourra maintenir cette position avantageuse.

Conclusion générale

Au vue de l'élan des avancées technologiques portant de nouvelles performances à la technologie LED, le modèle montre que sur le score agrégé ainsi que sur l'ensemble des indicateurs des catégories d'impacts environnementaux, le luminaire à LED produit à partir de l'année 2020 présente des avantages significatifs le rendant plus durable que les autres luminaires livrés antérieurement (57% contre 97%).

La modélisation a montré, également que pour la phase utilisation, les indicateurs des dix (10) catégories d'impacts varient sensiblement en fonction du mix énergétique alimentant l'installation d'éclairage public, ils sont majoritairement sur une tendance baissière pour une alimentation, par exemple en énergie hydroélectrique et inversement pour des énergies fossiles.

Le LED impacte nettement moins que le SHP en phase d'utilisation.

Selon des articles scientifiques, il a été possible, grâce à la méthode EI99 et le logiciel Simapro de modéliser une comparaison entre les impacts de la phase utilisation du luminaire LED, sous énergie hydroélectrique, contre ses impacts en phase de fin de vie (EoL), ces derniers sont évalués à 48% contre 52% pour les premiers. Ceci souligne l'importance à accorder au traitement de fin de vie des luminaires LED réformés à l'effet de réduire leur pression environnementale à ce stade du cycle de vie.

Les catégories ayant un fort potentiel dans la phase de fin vie du luminaire à LED sont ceux liés aux indicateurs du réchauffement climatique, de l'épuisement des ressources abiotiques (ADP) et de la dégradation de la couche d'ozone (ODP) avoisinant tous les 80%.

Les modèles de comparaison entre un luminaire à LED et celui à lampe en Céramique Métal Halide (CMH), montrent une tendance similaire aux résultats, ci-dessus, discutés et plus particulièrement pour les indicateurs de consommation d'énergie et d'émission de CO2 favorisant le système à LED.

La comparaison à l'issue de l'agrégation des scores de fabrication et d'utilisation était nettement favorable au luminaire LED (350 points contre 410 points).

Les indicateurs d'impacts s'y rapportant à la phase d'utilisation sont plus élevé par rapport aux autres phases du fait que les calculs y afférents tiennent compte de toute la durée de vie minimale du luminaire (15 ans) prévue dans l'unité fonctionnelle.

Il ressort de cette étude que les systèmes d'éclairage public ont une multiplicité d'impacts environnementaux dont le niveau de criticité diffère d'une technologie à une autre.

Conclusion générale

La diminution de la consommation d'énergie durant la phase d'utilisation est un élément décisif et aura un effet d'entraînement quant à la réduction de la majorité des autres impacts environnementaux.

La comparaison selon divers scores environnementaux liés aux phases du cycle de vie et selon des scores agrégés montre que la technologie LED possède des avantages environnementaux comparativement aux autres technologies (SHP et CMH) ce qui lui confère une rentabilité écologique intéressante.

Par ailleurs, les évolutions technologiques et les progrès des énergies renouvelables (de la transformation énergétique) continuent à mener les performances énergétiques et environnementales du luminaire LED à des niveaux supérieurs encourageant la généralisation de son utilisation.

PERSPECTIVES

Etant donné que les luminaires à LED s'y prêtent plus facilement aux dispositifs de contrôle (diming, gradation, télégestion, flexibilité au paramétrage ...), le renforcement des installations d'éclairage par des équipements de la smart technologie semble être la piste vers un changement de paradigme pour un monde soucieux d'un véritable développement durable.

Indépendamment de l'optimisation des impacts visés par les études ACV, les solutions intelligentes adossées de l'Internet des objets (IoT) appliquées aux installations d'éclairage public mènera une multitude de fonctionnalités à ces dernières (borne de connexion Internet, gestion du stationnement, gestion du trafic routier, télésurveillance et sécurité, communication, support de recharge électrique...) ce qui donnerait au déploiement de ce type d'installation un retour sur investissement multifacettes (Environnementale, économique...).

Une véritable lutte contre la pollution lumineuse, la préservation de la faune, de la flore et de la santé humaine sont tributaires de ce développement dont les multiples expériences pilotes révèlent des potentialités prometteuses. Les grands axes de ces progrès ont été traités dans le chapitre IV de cette thèse de manière informationnelle.

Conclusion générale

Il appartient à la communauté scientifique et aux pouvoirs publics d'encourager la prise en charge de sujets de recherches et des études (ACV et autres outils) à l'effet de vérifier et de mettre en exergue la pertinence et l'efficacité de ces pistes de développement durable.

Dans le même sillage, une ACV comparative entre une installation d'éclairage à LED alimentée par le réseau et une alimentation en panneaux solaires (indépendant) s'avère un autre axe d'étude et d'investigation qui pourrait mettre en exergue d'éventuelles améliorations des performances.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] ISO, “14040:2006 Analyse du cycle de vie – Principes et cadre,” vol. 2006, 2006.
- [2] ISO, “La famille ISO 14000 des normes internationales pour le management environnemental L ’ ISO en bref L ’ ISO et l ’ environnement,” 2009.
- [3] E. Guilyardi *et al.*, “IPCC special report global warming of 1.5 ° C. Summary for teachers coordinator,” *ResearchGate*, no. December, pp. 1–24, 2018, [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/12/ST1.5_OCE_LR.pdf<https://www.researchgate.net/publication/332717759>
- [4] A. Plomteux, *Enjeux environnementaux* :, no. ÉDITION 2019 – DÉPÔT LÉGAL 2019 – D/2019/11.563/1. 2019. [Online]. Available: www.ligue-enseignement.be
- [5] U. S. Embargo, “United In Science United In Science : High-level synthesis report of latest climate science information convened by the Science Advisory Group of the UN Climate Action Summit 2019,” no. September, p. 28, 2019, [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/bitstream/>
- [6] G. F. N. 2019a., “Humanity’s Ecological Footprint contracted between 2014-2016,” 2019. <https://www.footprintnetwork.org/2019/04/24/humanitys-ecological-footprint-contracted-between-2014-and-2016/>
- [7] G. F. N. 2019a, “Earth Overshoot Day 2019.” <https://www.footprintnetwork.org/2019/06/26/press-release-june-2019-earth-overshoot-day/>
- [8] S. Z. de L. GROOTEN, M. and Alemond, REA (eds) SZL, *Rapport Planète Vivante 2018, Soyons ambitieux*. WWF, Gland-Suisse, 2018.
- [9] Philippe BIHOUIX, “avril_2015_conference_ecoinfo_cnrs_metaux_dans_les_tic-img800q90.pdf,” 2015. [Online]. Available: <https://ecoinfo.cnrs.fr/2015/04/10/10-ans-decoinfo-vers-une-informatique-eco-responsable-23-avril-2015-cnrs-paris/>
- [10] U. S. G. Survey, “MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2019,” 2019. doi: <https://doi.org/10.3133/70202434>.
- [11] B. S. R. of W. Energy, “Energy Statistical Review of World,” London-UK, 2019.
- [12] G. C. économiste de l’Agence F. de D. Giraud, Paris - France. *Effondrement financier ou effondrement climatique [EN DIRECT] l’Agence Française de Développement . Thinkerview. Disponible à : www.youtube.com/watch - <https://youtu.be/2oFARgqG0NA> consulté le 21 août 2021*, (2019). [Online]. Available: <https://youtu.be/2oFARgqG0NA>
- [13] Denis DELESTRAC, France. *Documentaire diffusé en 2013 sur Arte. Disponible à <https://youtu.be/QsCdutebu4Q>*, (2013). [Online]. Available: <https://www.youtube.com/channel/UCnSNAw4U8FxtLEpFa0ZX8ag>
- [14] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. Jan, “The Circular Economy e A new sustainability paradigm ?,” *J. Clean. Prod.*, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- [15] R. C. Sénateur, “N° 1133 Assemblée Nationale: Les perspectives d’évolution de l’aviation civile à l’horizon 2040 : préserver l’avance de la France et de l’Europe,” Paris - France, 2013. [Online]. Available: <https://www.senat.fr/rap/r12-658/r12-658.html>

- [16] J. G. Koomey, S. Berard, M. Sanchez, and H. Wong, "Implications of historical trends in the electrical efficiency of computing," *IEEE Ann. Hist. Comput.*, vol. 33, no. 3, pp. 46–54, 2011, doi: 10.1109/MAHC.2010.28.
- [17] A. Plomteux, *Comprendre pour agir, le numérique de A à Z, Rendre visible l'invisible*. 2020.
- [18] WMO, *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2018.*, no. 1085. Genève - Suisse, 2019. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/0BwdvoC9AeW-jUeEV1cnZ6QURVaEE/edit?usp=sharing>
- [19] GIEC, *Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5°C, Rapport spécial du GIEC*. 2018. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_fr.pdf
- [20] P. Jean-Francois Bastin¹, Friedlingstein, M. Allen, J. G. Canadell, G. P. Peters, and S. I. Seneviratne, "Comment on 'The global tree restoration potential,'" *Science (80-.)*, vol. 366, no. 6463, pp. 76–79, 2019, doi: 10.1126/science.aay8060.
- [21] M. Fajardy, A. Koberle, N. Mac Dowell, and A. Fantuzzi, "BECCS deployment: a reality check," *Grantham Inst.*, vol. 28, no. 28, pp. 1–14, 2019.
- [22] A. Edo, E. Hertwich, and N. Heeren, "Emissions Gap Report 2019," 2019. [Online]. Available: <http://www.unenvironment.org/emissionsgap>
- [23] J. Chory, *How supercharged plants could slow climate change |disponible sur TED www.youtube.com/watch . https://youtu.be/pyFcr2WcOyo*, (2019). [Online]. Available: <https://youtu.be/pyFcr2WcOyo>
- [24] V. Poudalet, "OPÉRATIONNALISATION DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE POUR LE DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX," 2011.
- [25] D. (Agence wallonne de l'Air et du C. Eggermont, *Méthodes d'analyse environnementale Analyse de cycle de vie , Bilan CO2 , Empreinte*. 2013, p. 30.
- [26] M. Ritthoff, H. Rohn, and C. Liedtke, *Calculating MIPS : resource productivity of products and services*, vol. Wuppertal. 2002. [Online]. Available: <http://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/1577>
- [27] L. Aissani, L. Aissani, and L. Perier-camby, "Intégration des paramètres spatio-temporels et des risques d'accident à l'Analyse du Cycle de Vie : Application à la filière hydrogène énergie et à la filière essence To cite this version : HAL Id : tel-00783708 présentée par Intégration des paramètre," 2013.
- [28] M. (n. d. . Rees, W., & Wackernagel, "Urban Ecological Footprints: Why Cities Cannot be Sustainable—and Why They are a Key to Sustainability," vol. 1988, no. 1990, pp. 38–59, 1994, doi: 10.1007/978-0-387-73412-5_35.
- [29] M. Raymond, *L'ÉVALUATION DES IMPACTS*, ÉDITIONS M. Sainte-Foy CANADA: Diffusion Dimedia, 2000.
- [30] Ibtissam EL Bouazzaoui, "L'EMPREINTE ECOLOGIQUE : Proposition d'un modèle synthétique de représentation des empreintes à l'échelle Micro d'une organisation ou d'un projet," 2008.

- [31] N. . Gondran and A. Boutaud, “ Empreinte écologique: comparer la demande et l’offre de ressources régénératives de la biosphère. L’Encyclopédie du Développement durable,” *Ed. des RECOLLETS*, vol. 105, pp. 1–7, 2009.
- [32] F. Benoit-moreau, F. Larceneux, and B. Parguel, “Mieux vaut bien faire et le faire dire : Le rôle des notations environnementales dans la régulation du greenwashing,” 2010, [Online]. Available: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00636236>
- [33] P. H. Brunner and H. Rechberger, “Material Flow Analysis B o o k Reviews Practical Handbook of Material Flow Analysis,” *Waste Manag.*, vol. 9, no. 5, pp. 337–338, 2004.
- [34] C. M. Raymond *et al.*, “Mapping community values for natural capital and ecosystem services,” *Ecol. Econ.*, vol. 68, no. 5, pp. 1301–1315, 2009, doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.12.006.
- [35] A. L. Éonard, S. B. Elboom, and S. G. Erbinet, “L ’ analyse du cycle de vie : un outil multicritères et quantitatif pour l ’ évaluation des impacts environnementaux,” *Bull. la Société R. des Sci.*, vol. 88, pp. 73–81, 2019.
- [36] A.-M. Baumann, Henrikke, Tillman, “The Hitch Hiker’s Guide to LCA - An orientation in LCA methodology and application.,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11(2), pp. 142–142, 2004.
- [37] A. A. Jensen *et al.*, “Life Cycle Assessment (LCA) - A guide to approaches, experiences and information sources,” no. 6, 1997.
- [38] M. Finkbeiner, E. M. Schau, A. Lehmann, and M. Traverso, “Towards life cycle sustainability assessment,” *Sustainability*, vol. 2, no. 10, pp. 3309–3322, 2010, doi: 10.3390/su2103309.
- [39] G. Rebitzer *et al.*, “Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications,” *Environ. Int.*, vol. 30, no. 5, pp. 701–720, 2004, doi: 10.1016/j.envint.2003.11.005.
- [40] C. Sablayrolles, “L ’ analyse du cycle de vie pour le développement de nouveaux procédés de valorisation des bio-ressources,” no. April, 2013.
- [41] S. H. and L. M. i Canals, “Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment,” *Sci.* 344, vol. 1109, no. 6188, pp. 1109–1113, 2014, doi: 10.1126/science.1248361.
- [42] A. A. Burgess and D. J. Brennan, “Application of life cycle assessment to chemical processes,” vol. 56, pp. 2589–2604, 2001.
- [43] A. LAUTIER, “METTRE EN CONTEXTE LES RÉSULTATS D ’ UNE ANALYSE DE CYCLE DE VIE : DÉVELOPPEMENT DE FACTEURS DE NORMALISATION CANADIENS ET PROBLEMATIQUE DE LA DEFINITION DES FRONTIERES,” 2010.
- [44] V. Moreau, V. Moreau, M. De, and V. Moreau, “Méthodologie de représentation des impacts environnementaux locaux et planétaires , directs et indirects - Application aux technologies de l ’ information .,” 2013.
- [45] I. Documentation, “ISO/TS 14048: SPÉCIFICATION TECHNIQUE, Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Format de documentation de données,” *ISO Doc.*, vol. 2002, p. 15, 2002.

- [46] A.-A. France, “OPTIMISATION DE LA GESTION DES DECHETS MUNICIPAUX Comment évaluer les impacts environnementaux au moyen de l ’ analyse du cycle de vie (ACV),” 2005.
- [47] Y. Wang, M. Reddy, and a Gupta, “An object-oriented implementation of quality data products,” *WITS- '93 Conf. Proc.*, no. December, pp. 1–13, 1993, [Online]. Available: http://link.springer.com/chapter/10.1007/10529543_2%5Cnhttp://mitiq.mit.edu/document s/publications/TDQMpub/WITS93ObjectDec93.pdf
- [48] L. Barna and E. Benetto, *RECORD- Approche méthodologique intégrée pour l ’ évaluation des impacts environnementaux des filières de valorisation des résidus minéraux*. 2006, p. 210. [Online]. Available: www.record-net.org
- [49] H. A. U. de H. GHans Bruijn, Robbert Duin, Mark A. J. Huijbregts, Jeroen B. Guinee, Marieke Gorree, Reinout Heijungs, Gjalt Huppes, Renée Kleijn, Arjan Koning, Laurant Oers, Anneke Wegener Sleswijk, Sangwon Suh, *Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards*, Eco-Effici. Dordrecht Pays-Bas: Springer KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2006. doi: <https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7>.
- [50] L. WENZEL, Henrik, HAUSCHILD, Michael Z., et ALTING, *Environmental Assessment of Products*, vol. Volume 1 M. Springer Science & Business Media, 1997.
- [51] H. HAUSCHILD, Michael et WENZEL, *Environmental assessment of products.*, vol. Volume 2: Springer, 1998.
- [52] P. S. Lake *et al.*, “Global change and the biodiversity of freshwater ecosystems: Impacts on linkages between above-sediment and sediment biota,” *Bioscience*, vol. 50, no. 12, pp. 1099–1107, 2000, doi: 10.1641/0006-3568(2000)050[1099:GCATBO]2.0.CO;2.
- [53] R. Hischier *et al.*, “Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2 (2010),” *ecoinvent Rep. No. 3*, no. 3, p. 176, 2010, [Online]. Available: https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf
- [54] M. Z. Hauschild *et al.*, “Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, no. 3, pp. 683–697, 2013, doi: 10.1007/s11367-012-0489-5.
- [55] R. K. Rosenbaum, T. M. Bachmann, O. Jolliet, R. Juraske, A. Koehler, and M. Z. Hauschild, “USEtox — the UNEP-SETAC toxicity model : recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment,” pp. 532–546, 2008, doi: 10.1007/s11367-008-0038-4.
- [56] B. Laratte, “Evaluation dynamique et cumulative des impacts environnementaux dans le cadre d ’ une analyse de cycle de vie,” 2013.
- [57] M. A. J. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [58] J. Guinee, “Editorial: Announcing a New LCA Guide,” *Int. J. LCA*, vol. 6, no. 5, p. 255, 2001.
- [59] M. A. J. Huijbregts *et al.*, *Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment. Part I: Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multi-media*

- fate, exposure and effects model USES-LCA*, vol. 41, no. 4. 2000. doi: 10.1016/S0045-6535(00)00030-8.
- [60] O. J. Sébastien Humbert, An De Schryver, Xavier Bengoa, Manuele Margni, “IMPACT 2002 + : User Guide,” 2012. [Online]. Available: www.pe-international.com
- [61] O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, and G. Rebitzer, “Presemng a New Method IMPACT 2002 + : A New Life Cycle Impact Assessment Methodology,” *Int JLCA*, vol. 8, no. 6, pp. 324–330, 2003.
- [62] M. Goedkoop, S. Effting, and M. Collignon, *The Eco-indicator 99*. 2000.
- [63] M. Goedkoop and R. Spriensma, “The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment,” *Assessment*, no. January 2000, p. 144, 2001.
- [64] A. Wegener Sleeswijk, *Regional Lca in a Global Perspective*. 2010.
- [65] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [66] R. Frischknecht *et al.*, “ecoinvent : Introduction The ecoinvent Database : Overview and Methodological Framework,” vol. 10, no. 1, pp. 3–9, 2005.
- [67] I. T. Herrmann and A. Moltesen, “Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? - A comparative assessment of SimaPro and GaBi,” *J. Clean. Prod.*, vol. 86, pp. 163–169, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.004.
- [68] S. B. H. Gmbh, “Rapport annuel DASSAUT SYSTEMS,” pp. 1–23, 2016.
- [69] “La Base INIES : les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment et la RE2020,” pp. 1–35.
- [70] U. A. Library, “LCA Commons Submission Guidelines,” pp. 1–56, 2018.
- [71] M. Vargas-gonzalez and L. Hamon, “Rapport final,” vol. 33, no. 0, 2014.
- [72] V. Debusschere *et al.*, “Enseignement en Eco-Conception : une expérience à l ’ ENS de Cachan,” *EDP Sci.*, no. 1, p. 08, 2010, doi: <http://dx.doi.org/10.1051/j3ea/2010021>.
- [73] R. Hischier, “le plus complète des bases de données pour des analyses de cycle de vie,” 2011.
- [74] “Memoria de sostenibilidad,” *Wizness Publ. Mem.*, p. 85, 2013.
- [75] E. M. Mark Goedkoop, Michiel Oele, Marisa Vieira, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, “SimaPro Tutorial Colophon version 5.3.” San Francisco, California, 94105, USA., 2016. [Online]. Available: http://creativecommons.org/%0Alicenses/by-nc-sa/3.0/nl/deed.en_US
- [76] ifu H. GmbH, “Umberto ® Efficiency+ User manual V10,” Hamburg / Germany, 2017. [Online]. Available: www.umberto.de
- [77] U. N. X. T. Lca, “Umberto ® NXT LCA,” no. January, 2016.
- [78] Thinkstep, “GaBi Manual (Manual d’utilisation de GABI),” Stuttgart - Allemagne, 2012. [Online]. Available: https://gabi.sphera.com/fileadmin/GaBi_Manual/GaBi_6_manual.pdf
- [79] M. Trocmé and B. Peuportier, “Analyse de Cycle de Vie d ’ un bâtiment,” no. January 2008,

2014, doi: 10.1051/j3ea.

- [80] “<https://codde.fr/nos-logiciels/presentation-eime>, consulté le 1 août 2021.”
- [81] M. Rossi, M. Germani, and A. Zamagni, “Review of ecodesign methods and tools. Barriers and strategies for an effective implementation in industrial companies,” *J. Clean. Prod.*, vol. 129, pp. 361–373, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.051.
- [82] R. Saad, F. Charron-Doucet, and E. Clément, “Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec,” *Recyc-Québec*, pp. 1–4, 2015, [Online]. Available: http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/upload/publications/ACV_verre_rapport.pdf
- [83] W. Dewulf and J. Duflou, “Simplifying LCA Using Indicator Approaches - A Framework -,” *Proc. 10th CIRP Life Cycle Semin.*, no. May, 2003.
- [84] M. Souley and A. Thoraval, “Nonlinear mechanical and poromechanical analyses : comparison with analytical solutions,” *COMSOL Conf. 2011*, p. NC, 2011, [Online]. Available: <http://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00973639/>
- [85] K. T. Ulrich, S. D. Eppinger, and I. McGraw-hill, “Concept Selection & Test,” *Archit. Eng. Syst. Des.*, 2009.
- [86] R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington, and S. Suh, “Recent developments in Life Cycle Assessment,” *J. Environ. Manage.*, vol. 91, no. 1, pp. 1–21, 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2009.06.018.
- [87] I. El Bouazzaoui and I. El Bouazzaoui, “L ’ EMPREINTE ECOLOGIQUE : Proposition d ’ un mod ` ele synth ´ etique de repr ´ esentation des empreintes ` a l ’ ´ echelle ” Micro ” d ’ une organisation ou d ’ un projet To cite this version : Spécialité : Sciences et Génie de l ’ Environnement L ’ EMP,” 2008.
- [88] E. E. Eléonore, Loiseau, *Les méthodes d ’ évaluation des impacts environnementaux liés aux usages de l’eau*, no. 33. 2010.
- [89] “Programme d ’ action pour l ’ efficacité énergétique,” pp. 1–22, 2011.
- [90] B. Dessus, P. D. G. Chance, B. Laponche, and G. Chance, “Réchauffement climatique : importance du méthane,” pp. 44–49, 2020.
- [91] R. A. HOUGHTON, “Land-use change and the carbon cycle,” *Glob. Chang. Biol.*, vol. 1, no. 4, pp. 275–287, 1995, doi: 10.1111/j.1365-2486.1995.tb00026.x.
- [92] H. Program, A. S. Division, and A. E. Centre, “Occurrence a N D Toxicological Evaluation of,” vol. 27, no. 3, pp. 495–506, 1993.
- [93] C. C. Godard *et al.*, “L ’ analyse de cycle de vie appliquée aux biomasses énergie : Exemple de l ’ approvisionnement de la chaudière Lin 2000 To cite this version : HAL Id : hal-01000983,” 2020.
- [94] R. G. Derwent, M. E. Jenkin, and S. M. Saunders, “Photochemical ozone creation potentials for a large number of reactive hydrocarbons under European conditions,” *Atmos. Environ.*, vol. 30, no. 2, pp. 181–199, 1996, doi: 10.1016/1352-2310(95)00303-G.
- [95] H. C. Moll, K. J. Noorman, R. Kok, R. Engström, H. Throne-Holst, and C. Clark, “Pursuing more sustainable consumption by analyzing household metabolism in European countries and cities,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 9, no. 1–2, pp. 259–275, 2005, doi:

10.1162/1088198054084662.

- [96] M. Janin, I. Conception, and M. Environnement, “construire la cohérence entre outils et processus To cite this version : Ecole Nationale Supérieure d ’ Arts et Métiers,” 2004.
- [97] C. Petiot, F. Witte, Y. Le, G. Indicateurs, and D. E. Des, “INDICATEURSD’EPUISEMENTDES RESSOURCES ENANALYSE DE CYCLE DE VIE,” Villeurbanne France, 2019. doi: HAL Id:hal-02269178.
- [98] J. B. Guinée and R. Heijungs, “A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment,” *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 14, no. 5, pp. 917–925, 1995, doi: 10.1002/etc.5620140525.
- [99] ISO, “14040: Environmental management–life cycle assessment—Principles and framework,” *Int. Organ. Stand.*, vol. 2006, 2006.
- [100] Z. A. Bassin, “La démarche écotoxicologique pour la protection qualité des milieux,” no. 26, 2009.
- [101] INRA and Cemagref, “Pesticides, agriculture et environnement: Réduire l ’ utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux: Expertise scientifique collective,” no. January, p. 64, 2005.
- [102] D. E. Montr *et al.*, “Développement De Facteurs De Caractérisation Pour Les Mélanges Complexes D ’ Hydrocarbures Pour L ’ Évaluation De L ’ Impact Écotoxicité Aquatique En Analyse Du Cycle De Vie,” 2010.
- [103] R. Frischknecht *et al.*, “Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v1.1 (2004),” *ecoinvent Rep. No. 3*, no. 3, p. 116, 2004, [Online]. Available: https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_weidema_implementation_of_lcia_methods.pdf
- [104] G. & L. (Idelec P. GALLAY, “Les solutions d ’ efficacité énergétique pour les bâtiments ebook sommaire,” *Ebook*, p. 15, 2017, [Online]. Available: <https://www.idelecplus.com/livre-solutions-efficacite-energetique-batiments?submissionGuid=cf369c67-3709-47bd-bc62-f69e424e2341>
- [105] S. Challéat and D. Lapostolle, “N atures S ciences S ociétés (Ré) concilier éclairage urbain et environnement nocturne : les enjeux d ’ une controverse sociotechnique,” vol. 328, no. 2014, pp. 317–328, 2015, doi: 10.1051/nss/2014045.
- [106] N. Phannil, C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, “Harmonics and Reduction of Energy Consumption in Lighting Systems by Using LED Lamps,” 2018, doi: 10.3390/en11113169.
- [107] S. A. Daniel Schumann, “Guide technique des collectivités locales en Tunisie: Eclairage public”.
- [108] S. Epice, E. Public, and C. Electroniques, “GUIDE DE CONCEPTION DES INSTALLATIONS D ’ ECLAIRAGE EXTERIEUR,” 2013.
- [109] C. Umr, I. Galilée, and U. Paris, “L ’ Optique Arabe de la période médiévale L ’ exemple d ’ Ibn al Haytham,” pp. 34–38.
- [110] I. Mueller, “2005 Institute for Research in Classical Philosophy and Science All rights reserved,” vol. 4497, pp. 119–126, 2005.
- [111] P. N. Y. Dr. Messaoud KHELIF, *Référentiel National pour une Lumière de Qualité et*

- Ecoénergétique*. 2021. [Online]. Available: <https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2022/02/Eclairage-Public-en-Algerie.pdf>
- [112] L. E. D. E. Development, “LEDs blanches : les différentes technologies 3 Les technologies,” 1993.
- [113] M. Tarek, “Eclairages à LEDs : Théories et exemples de réalisation pratique 2016,” <https://www.academia.edu/>, 2016, [Online]. Available: https://www.academia.edu/42924265/Elec_Projecteurs_a_leds
- [114] dipl. I. Z. K. E. B. V. GmbH, “Constant current LED drivers,” 2022, [Online]. Available: [file:///C:/00 TOSHIBA/02 Doctorat UMBB/01 Ma thèse/07 Cas pratique/23_LEDdrv.pdf](file:///C:/00%20TOSHIBA/02%20Doctorat%20UMBB/01%20Ma%20th%C3%A8se/07%20Cas%20pratique/23_LEDdrv.pdf)
- [115] R. Sordello, S. Vanpeene, C. Azam, C. Kerbirou, and I. Le Viol, “impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être pris en compte dans les réseaux écologiques ? HAL Id : hal-02605886 Effet fragmentant de la lumière artificielle Quels impacts sur la mobilité des espèces et comment peuvent-ils être,” 2020.
- [116] S. Vanpeene, R. Sordello, J. Amsallem, and L. Billon, “Bilan technique et scientifique sur l ’ élaboration des Schémas régionaux de cohérence écologique Méthodes d ’ identification des obstacles et d ’ attribution des objectifs,” vol. 2, 2017.
- [117] R. Sordello, “Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement Pollution lumineuse et trame verte et bleue : vers une trame noire en France ?,” no. 2010, pp. 1–11, 2021.
- [118] C. Gronfier, B. Claustrat, P. Denis, and H. M. Cooper, “Aging of Non-Visual Spectral Sensitivity to Light in Humans : Compensatory Mechanisms ?,” vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0085837.
- [119] A. Gutierrez-escolar, A. Castillo-martinez, J. M. Gomez-pulido, Z. Stacic, and M. Road, “A Study to Improve the Quality of Street Lighting in Spain,” pp. 976–994, 2015, doi: 10.3390/en8020976.
- [120] C. Dans and L. E. S. Collectivit, “FICHES,” 2020.
- [121] L. Tähkämö and L. Halonen, “Life cycle assessment of road lighting luminaires - Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies,” *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 234–242, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.025.
- [122] A. T. Dale, M. M. Bilec, J. Marriott, D. Hartley, C. Jurgens, and E. Zatcoff, “Preliminary Comparative Life-Cycle Impacts of Streetlight Technology,” *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 193–199, 2011, doi: 10.1061/(asce)is.1943-555x.0000064.
- [123] S. Lundie, G. M. Peters, and P. C. Beavis, “Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 13, pp. 3465–3473, 2004, doi: 10.1021/es034206m.
- [124] J. R. Tuenge, B. J. Hollomon, H. E. Dillon, and L. J. Snowden-Swan, “Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products, Part 3: LED Environmental Testing,” 2013, doi: 10.2172/1074312.
- [125] H. Zhang, J. Burr, and F. Zhao, “A comparative life cycle assessment (LCA) of lighting technologies for greenhouse crop production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 705–713, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.014.

- [126] S. Abdul Hadi, M. R. Al Kaabi, M. O. Al Ali, and H. A. Arafat, "Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in united arab emirates," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 17, no. 5, pp. 438–450, 2013, doi: 10.1016/j.esd.2013.05.001.
- [127] T. F. Golob and W. W. Recker, "Relationships Among Urban Freeway Accidents , Traffic Flow , Weather , and Lighting Conditions," no. August, pp. 342–353, 2003.
- [128] J. J. Lukkien, "Exploring User-Centered Intelligent Road Lighting Design : A Road Map and Future Research Directions," vol. 57, no. 2, pp. 788–793, 2011.
- [129] M. Bonomolo, A. Galatioto, and E. Pulvirenti, "Smart lighting in historic context : a case study," 2017.
- [130] A. Se, "Towards Highly Energy-Efficient Roadway Lighting," pp. 1–16, 2020, doi: 10.3390/en9040263.
- [131] I. Wojnicki, "Empirical Study of How Traffic Intensity Detector Parameters Influence Dynamic Street Lighting Energy Consumption : A Case Study in Krakow , Poland," 2018, doi: 10.3390/su10041221.
- [132] I. Wojnicki and K. Komnata, "Standards and Dynamic Control," 2019, doi: 10.3390/en12081524.
- [133] T. Issac, S. Silas, and E. B. Rajsingh, *Dynamic and static system modeling with simulation of an eco-friendly smart lighting system*. Elsevier Inc., 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-819779-0.00005-8.
- [134] F. V Topalis, "The role of dimming," *Energy Build.*, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.02.013.
- [135] C. Universit and L. Septembre, "OUTIL DE GESTION DE L ' ECLAIRAGE PUBLIC DES PARCS D ' ACTIVITÉS , DURABLE ET INTELLIGENTE," 2014.
- [136] D. Eclairage and D. Intelligente, "GEPPADI : un éclairage intelligent en test à Grâce-Hollogne".
- [137] M. de Pierre CAMBON & Bénédicte SARRAMONS Service de l'Urbanisme et de l'Environnement Toulouse, *No Title Mobilier Urbain Cahiers de l'espace public*. Toulouse - France, 2008.
- [138] D. Campisi, S. Gitto, and D. Morea, "Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome," *J. Clean. Prod.*, vol. 175, pp. 190–198, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.063.
- [139] D. Lapostolle *et al.*, "L ' appropriation de la transition énergétique par la protection des ressources environnementales nocturnes : expériences dans les Pyrénées et les Alpes du sud To cite this version : HAL Id : hal-01471516 L ' appropriation de la transition énergétique par," 2019.
- [140] F. Fédération Rhône-Alpes de protection de la nature, "éclairage extérieur Cahier technique de recommandations," p. 44, 2013, [Online]. Available: www.frapna-38.org/pollution-lumineuse
- [141] L. E. P. Europ, E. C. De, and U. Europ, "DIRECTIVE 2002/96/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)," vol. 5, pp. 24–38, 2003.

- [142] G. M. Mace *et al.*, “Aiming higher to bend the curve of biodiversity loss,” *Nat. Sustain.*, vol. 1, no. 9, pp. 448–451, 2018, doi: 10.1038/s41893-018-0130-0.
- [143] J. Halloy, “L’épuisement des ressources minérales et la notion de matériaux critiques,” *La Rev. Nouv.*, vol. N° 4, no. 4, pp. 34–40, 2018, doi: 10.3917/rn.184.0034.
- [144] S. M. Fortier *et al.*, “Annual Review 2020 : Critical Minerals USGS critical minerals review,” no. May, 2021.
- [145] P. P-y, “L’analyse du cycle de vie pour le développement de nouveaux procédés de valorisation des bioressources,” *Innov. Agron.*, vol. 26, no. 26, pp. 83–100, 2013.
- [146] S. Energétique, G. Procédés, I. Sommereux, and D. Froelich, “Evaluation des impacts environnementaux de filières énergie : vers une approche intégrée HABILITATION A DIRIGER LES,” no. June, 2010.
- [147] R. Y.Wang, M.P.Reddy, and H. B.Kon, “Toward quality data: An attribute-based approach,” *Decis. Support Syst.*, vol. 13, pp. 349–372, 1995.
- [148] J. Yamasaki, T. Ikaga, and N. Itsubo, “Annual Nationwide Environmental Impact Assessment of Japanese Municipalities by Type of Business within the Endpoint-type LCIA Method ‘IIME2,’” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 410, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/410/1/012067.
- [149] A. Cemacv, “Rapport de synthèse - décembre 2009 Comparaison de deux logiciels d’ACV GaBi 4 et Simapro 7.1.8,” 2009.