

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

Analyse de l'impact environnemental du cycle de vie des déchets d'équipements électroniques en Belgique

Jullien, Thibault

Award date:
2020

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Analyse de l'impact environnemental du
cycle de vie des déchets d'équipements
électroniques en Belgique

JULLIEN Thibault

UNIVERSITÉ DE NAMUR
Faculté d'informatique
Année académique 2019-2020

**Analyse de l'impact environnemental du
cycle de vie des déchets d'équipements
électroniques en Belgique**

JULLIEN Thibault



Promoteur : _____ (Signature pour approbation du dépôt - REE art. 40)
PETIT Michaël

Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de
Master en Sciences Informatiques.

Avant-propos

Je tiens à remercier tout particulièrement mon promoteur, le Professeur Michaël Petit, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux et sa supervision éclairée tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également mes proches et tout particulièrement mon épouse pour le soutien qu'ils m'ont témoigné.

Résumé

La réduction des dommages sur l'environnement du traitement des déchets électroniques, et de manière générale des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), est inéluctablement devenue un enjeu pour l'ensemble des nations. A ce titre, la Belgique est tenue par ses engagements vis-à-vis de l'Union européenne, à mettre en place des procédés qui visent à réduire l'impact environnemental du traitement de ce type de déchets. Pour maximiser le bénéfice d'une gestion appropriée du flux des déchets électroniques, c'est en agissant à toutes les étapes du cycle de vie du produit qu'il faut intervenir. Ce mémoire a pour objectif d'analyser la position de la Belgique par rapport à ces étapes. Il est divisé en trois parties. Une première partie fait la synthèse des articles scientifiques traitant du sujet des DEEE en Belgique. Une deuxième partie décrit le concept du cycle de vie et détaille les étapes qu'il comporte. Une troisième et dernière partie analyse l'état de la pratique en Belgique en matière de DEEE tout au long du cycle de vie et propose des pistes d'amélioration envisageables.

Mots clés: déchets électroniques, DEEE, cycle de vie, Belgique

Abstract

Reducing environmental damage due to the processing of electronic waste, and waste electrical and electronic equipment in general (WEEE), has inevitably become a challenge for all nations. As such, Belgium is bound by its commitments towards the European Union, to implement procedures aimed at reducing the environmental impact of the treatment of this type of waste. To maximize the benefit of appropriate management of the electronic waste flow, action must be taken at all stages of the life cycle of the electronic products. The purpose of this thesis is to analyze Belgium's state of practice in relation to these stages. It is divided into three parts. The first part summarizes scientific articles dealing with the subject of WEEE in Belgium. A second part describes the concept of the life cycle and explains the stages involved. A third and final part studies the state of practice in Belgium in terms of WEEE throughout the life cycle and suggests opportunities for improvement.

Keywords: electronic waste, WEEE, life cycle, Belgium

Table des matières

1	Introduction.....	9
2	Analyse de la littérature scientifique.....	13
2.1	Liste des mots clés.....	13
2.2	Sélection des bases de données de référence.....	15
2.3	Sélection des articles.....	19
2.4	Analyse quantitative.....	21
2.5	Analyse et synthèse de la littérature scientifique.....	25
2.5.1	Le recyclage.....	25
2.5.2	Impact environnemental.....	32
2.5.3	Mise en décharge.....	34
2.5.4	La collecte.....	37
3	Cycle de vie des équipements électriques et électroniques.....	39
3.1	Description du cycle de vie des EEE.....	39
3.2	Impact environnemental des étapes du cycle de vie des EEE.....	41
3.2.1	Extraction et transformation de matières premières.....	41
3.2.2	Fabrication.....	42
3.2.3	Distribution.....	44
3.2.4	Utilisation.....	45
3.2.5	Gestion de fin de vie.....	46
3.3	L'outil d'analyse du cycle de vie.....	47
3.4	L'éco-conception.....	49
4	Analyse de l'état de la pratique en Belgique.....	51
4.1	Extraction de matières premières.....	51
4.2	Fabrication.....	56
4.3	Distribution.....	58
4.4	Utilisation.....	60
4.5	Gestion de fin de vie.....	65

4.5.1	Flux enregistrés.....	65
4.5.2	Flux non enregistrés documentés.....	69
4.5.3	Flux non enregistrés et non documentés.....	71
4.5.4	Synthèse du rapport de Deloitte [93]	71
4.5.5	Traitement des DEEE dans les centres agréés Recupel.....	72
5	Conclusion	79
6	Bibliographie	81
7	Annexes	91

Table des figures

Figure 1 : Événements liés à la recherche de ressources	13
Figure 2 : Méthode de sélection des bases de données d'informations scientifiques	16
Figure 3 : Étapes du cycle de vie	40
Figure 4 : Contenu d'un PC (% du poids total) [25]	43
Figure 5 : Matériaux en très faible quantité (% du poids total) [25]	44
Figure 6 : Étapes d'analyse du cycle de vie [45][46]	47
Figure 7 : Production du minerai de fer en Belgique de 1840 à 1975 [55]	52
Figure 8 : Répartition par pays du nombre de mines métalliques en Europe en 2016 [58]	54
Figure 9 : Répartition par pays du nombre de projets miniers métalliques en Europe en 2016 [58]	54
Figure 10 : Répartition des secteurs de l'industrie manufacturière belge en 2018 [66] ..	57
Figure 11 : Transport de marchandises en Belgique [76]	59
Figure 12 : Usage pour la Belgique des téléphones portables, Internet et des réseaux sociaux [81]	61
Figure 13 : Type d'appareil employé pour Internet par des utilisateurs âgés de 16 à 64 ans [81]	61
Figure 14 : Flux des DEEE enregistrés [93]	66
Figure 15 : Point de recyclage Recupel [96]	66
Figure 16 : Structure du marché belge des ferrailleurs recycleurs de DEEE [93]	70
Figure 17 : Valorisation des TVM dans les centres de traitement agréés Recupel[102] 74	
Figure 18 : Valorisation des produits électroniques (à l'exception des TVM) dans les centres agréés Recupel [102]	74

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des moteurs de recherche retenus après analyse des caractéristiques et du contenu des bases de données. Source: adapté de Wikimedia Foundation Inc., 2020	17
Tableau 2 : Liste des articles sélectionnés.....	20
Tableau 3 : Récurrence des mots les plus courants par article	22
Tableau 4 : Nombre pour 1000 des mots les plus courants par article	22
Tableau 5 : Mise en évidence des premiers et deuxièmes maximums	23
Tableau 6 : Répartition des articles par catégorie établie.....	24
Tableau 7 : Composition et valeur potentielle des matières premières du flux mondial de DEEE en 2016 [21]	32
Tableau 8 : Liste des matériaux critiques pour l'Union européenne.....	52
Tableau 9 : Moyennes des taux d'émission de CO2 pour déplacer 1 tonne de marchandise sur 1 kilomètre [74][75]	59
Tableau 10 : Poids par habitant d'EEE mis sur le marché belge en 2018.....	60
Tableau 11 : Quantités des équipements électroniques traités en 2016	71
Tableau 12 : Différences POM et OOM dans les plans individuels entre 2014 et 2016 [93].....	76

1 Introduction

La classification « Déchets électroniques » regroupe les produits électroniques en fin de vie ou en fin d'utilisation. La particularité des équipements électroniques, c'est qu'ils fonctionnent grâce à des composants électroniques capables de traiter numériquement de l'information comme par exemple les circuits intégrés que l'on trouve en grand nombre dans les équipements informatiques [16]. Cette catégorie fait partie d'une classe plus globale appelée déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) qui regroupe tous les appareils qui fonctionnent grâce à des courants électriques ou des champs magnétiques [17].

Comme l'indique à ce sujet la directive européenne 2012/19/UE [18], le nombre de DEEE est sans cesse en augmentation. Cette croissance est liée à la progression constante d'appareils mis sur le marché due à des cycles d'innovation de plus en plus courts, ce qui entraîne une accélération du remplacement de ce type d'équipement. Comme ces appareils contiennent de nombreuses substances dangereuses, la directive 2012/19/UE a rédigé une série de mesures visant à améliorer l'efficacité du recyclage pour réduire les incidences néfastes pour l'environnement du traitement de ces déchets.

Pour répondre aux exigences environnementales européennes de collecte et de traitement des DEEE définies dans cette directive 2012/19/UE, la Belgique est tenue de mettre en place des stratégies de gestion de ces appareils en fin de vie. Cependant, cette prise en charge en fin de vie n'est que la dernière étape d'une série de phases appelée cycle de vie par lesquelles cet équipement est passé avant d'être qualifié de déchet. C'est par la mise en place de procédés minimisant l'impact environnemental à chacune des étapes du cycle de vie que sera réduite l'incidence sur l'environnement du traitement des DEEE.

Ce mémoire a comme finalité d'analyser les pratiques de gestion des DEEE par la Belgique à chacune des étapes du cycle de vie et de proposer des pistes d'amélioration afin d'en augmenter l'efficacité. Pour atteindre cet objectif, la première partie du mémoire est consacrée à la recherche des publications scientifiques portant sur le sujet des DEEE en Belgique. Il est suivi d'une partie consacrée à la mise en pratique des éléments du cycle de vie. Celle-ci est divisée en deux chapitres: le premier décrit les spécificités et les enjeux des étapes du cycle de vie et le deuxième, la mise en pratique de chacune de ces étapes en Belgique.

La première partie du mémoire intitulée « Analyse de la littérature scientifique », consiste à établir une première base de connaissances par l'étude de la documentation scientifique portant sur les DEEE en Belgique. En suivant le modèle de revues systématiques de la littérature proposé dans le guide de Kitchenham [19], c'est au travers de moteurs de recherche sélectionnés parmi des bases de données scientifiques que seront sélectionnés les articles portant spécifiquement sur la gestion des DEEE en Belgique. De ces articles ressortiront une série de thèmes permettant de rassembler les différents articles en catégories. Chacun de ces thèmes sera analysé au travers des articles qui y font largement référence.

Pour la suite du mémoire, ces informations seront complétées par des recherches étendues à tous les types de documents disponibles sur Internet: sites Internet, articles de presse, rapports, etc.

Cette première partie est suivie d'un chapitre consacré au « Cycle de vie des équipements électriques et électroniques ». Il porte sur les différentes étapes du cycle de vie de ces équipements depuis l'extraction ou l'acquisition de matières premières jusqu'à l'élimination finale du produit: extraction et transformation des matières premières, fabrication, distribution, utilisation, gestion de fin de vie. Chacune des étapes sera décrite au travers de l'incidence qu'elle peut avoir en matière d'environnement.

Cette section présente également l'outil d'analyse du cycle de vie (ACV) qui permet une étude approfondie de l'impact environnemental du cycle de vie d'un produit. Toutefois, cette technique ne sera pas utilisée dans l'élaboration de ce mémoire parce qu'elle est mieux adaptée à l'étude d'un produit spécifique plutôt qu'à une analyse globale des équipements électroniques. D'autre part, une ACV sur un ensemble de produits est généralement le travail d'une équipe de plusieurs personnes s'étalant sur plusieurs mois et exige trop de ressources que pour faire l'objet d'un mémoire.

Vient ensuite dans ce chapitre, la description du procédé d'éco-conception qui vise à déterminer les choix de conception d'un produit avant sa fabrication dans le but de réduire l'impact environnemental de toutes les étapes du cycle de vie.

Le dernier chapitre avant la conclusion, intitulé « Analyse de l'état de la pratique en Belgique », répond à la question posée sur le traitement des DEEE en Belgique. L'objectif est de détailler les dispositifs mis en place en Belgique à chacune des étapes du cycle de vie des DEEE. Pour chaque étape, une première étude consiste à faire un

état des lieux. Il permettra de connaître les différents procédés de gestion déjà mis en place et leur efficacité. Ensuite, cette analyse est suivie d'un bilan des pistes d'amélioration envisagées pour réduire l'incidence environnementale de chacune des phases du cycle de vie.

2 Analyse de la littérature scientifique

Le travail de recherche de documents constituant l'état de l'art a pour objectif de répondre à la question de la prise en charge par la Belgique des équipements électriques et électroniques en fin de vie. La méthode pour atteindre cet objectif reprend partiellement la série des lignes directrices proposées dans le guide de Kitchenham [19] pour effectuer des revues systématiques de la littérature.

Ces lignes directrices comprennent :

- le contexte : Dans ce cas, il est délimité au domaine des sciences informatiques pour être en concordance avec le master pour lequel ce mémoire est rédigé.
- la question de recherche : « Comment sont gérés par la Belgique les équipements électriques et électroniques en fin de vie ? »
- la stratégie : Elle a pour objectif de récolter les ressources à analyser, elle est construite sur une série de traitements illustrés à la Figure 1.

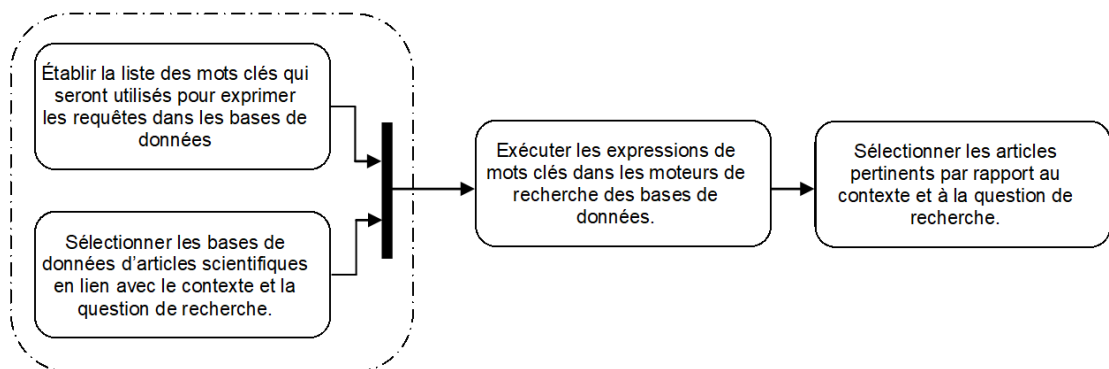


Figure 1 : Événements liés à la recherche de ressources

- la synthèse des données extraites: Elle consiste à rassembler, catégoriser et rédiger une analyse des articles scientifiques, issus de la recherche dans les bases de données sélectionnées.

2.1 Liste des mots clés

C'est à partir de la question de recherche qu'ont été déterminés les mots clés permettant de récolter les articles susceptibles de répondre à la question de la prise en charge par la Belgique des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

Toutefois, la question s'est posée de savoir dans quelle langue les mots clés devaient être formulés. Par expérience, on sait que le nombre d'articles rédigés en anglais est largement plus important que le nombre d'articles rédigés dans d'autres langues. C'est pour cette raison que nécessairement, une liste de mots clés en anglais s'imposait. Cependant, il paraissait intéressant de faire également des recherches avec des mots clés dans une autre langue comme le français, pour être certain de ne pas écarter des articles intéressants qui auraient été rédigés dans l'une des trois langues nationales de Belgique. C'est la raison pour laquelle il a été convenu que l'expression de la liste des mots clés anglais obtenue après analyse aurait son équivalent en français. Les deux expressions, une fois rédigées, seront simultanément utilisées dans chacun des moteurs de recherche des bases de données d'articles scientifiques.

Dans la problématique proposée, on peut distinguer deux parties. L'une concerne l'aspect géographique puisqu'on se concentre sur la prise en charge des équipements électriques et électroniques en Belgique. Mais au mot clé *belgium*, on a ajouté les termes *flanders*, *wallonia* et *brussels*. De cette manière, on s'assure de prendre en compte également les articles qui basent leur étude sur une ou plusieurs régions spécifiques du pays. De sorte qu'il n'y ait pas d'exclusion, ces quatre termes sont combinés avec l'opérateur booléen « OR » ou l'équivalent en fonction des spécificités des bases de données.

La seconde partie porte sur les équipements électriques et électroniques en fin de vie. Ils peuvent se décliner en anglais de plusieurs manières:

- *ewaste*;
- *e-waste*;
- *electronic waste*;
- *weee*.

Chacun de ces synonymes sera intégré dans la liste des mots clés. De la même manière que pour la Belgique et ses régions, la combinaison de ces termes s'élabore avec l'opérateur booléen « OR » sous les différentes formes qu'exigent les règles de recherche inhérentes aux moteurs de recherche des bases de données.

Les deux expressions obtenues sur base des deux aspects de l'étude sont alors conjuguées pour obtenir une expression complète regroupant l'ensemble des mots clés combinés. Elle se présente de manière générale sous la forme:

(belgium OR flanders OR wallonia) AND (ewaste OR e-waste OR electronic waste OR WEEE).

Pour la rédaction de l'expression en français, le terme *Belgique* est accompagné de ses 3 régions *Flandres*, *Wallonie* et *Bruxelles*. La notion de déchets électriques et électroniques peut se décliner sous différentes formes:

- *déchets d'équipements électriques et électroniques*;
- *déchets électriques et électroniques*;
- *DEEE*;
- *D3E*.

Ce qui nous donne comme expression de recherche :

(belgique OR flandre OR wallonie OR bruxelles) AND ("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR "déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E)

A chaque fois, les expressions seront adaptées sur base des contraintes techniques imposées par les bases de données dans lesquelles les recherches seront effectuées.

2.2 Sélection des bases de données de référence

C'est à partir de la liste des bases de données académiques et des moteurs de recherche disponibles sur le site Wikipedia [20] qu'a débuté la sélection de bases de données de référence permettant de trouver les articles pouvant constituer l'état de l'art. Cette page Wikipedia de site Internet contient une liste de 145 bases de données et de moteurs de recherche permettant d'accéder à des articles scientifiques dans des revues universitaires, des dépôts institutionnels, des archives ou d'autres collections d'articles scientifiques.

Une première sélection a pris en compte la discipline ciblée par la base de données. 96 bases de données sur les 145 ont été exclues du fait que la ou les discipline(s) associée(s) vise(nt) des domaines qui ne sont pas en lien avec les sciences de l'informatique qui constituent le contexte de l'étude. Parmi les 49 restantes, 19 ont été

retenues parce qu'elles ont une discipline liée aux domaines de l'informatique et 30 l'ont été parce qu'elles ont un champ d'application multidisciplinaire (voir Figure 2).

Ensuite, l'analyse de la description du domaine de connaissance a permis d'écarter 20 bases de données qui n'étaient pas non plus en rapport avec le domaine de l'informatique. Cette sélection a permis de conserver 29 bases de données pour lesquelles la description et le champ d'application avaient un intérêt significatif dans le cadre du contexte de l'étude.

Pour ces 29 bases de données restantes, leur moteur de recherche a été testé avec l'expression des mots clés lorsque cela était possible. 16 d'entre elles ont dû être écartées pour des raisons techniques essentiellement:

- Un lien conduit au site d'une base de données en japonais.
- 3 bases de données exigent une authentification réservée aux abonnés ou aux membres de leur université pour atteindre leur moteur de recherche.
- Le lien d'une base de données mène à un site ne comportant pas de moteur de recherche.
- 14 bases de données ne permettent pas de recherche avec une combinaison de mots clés complexe.

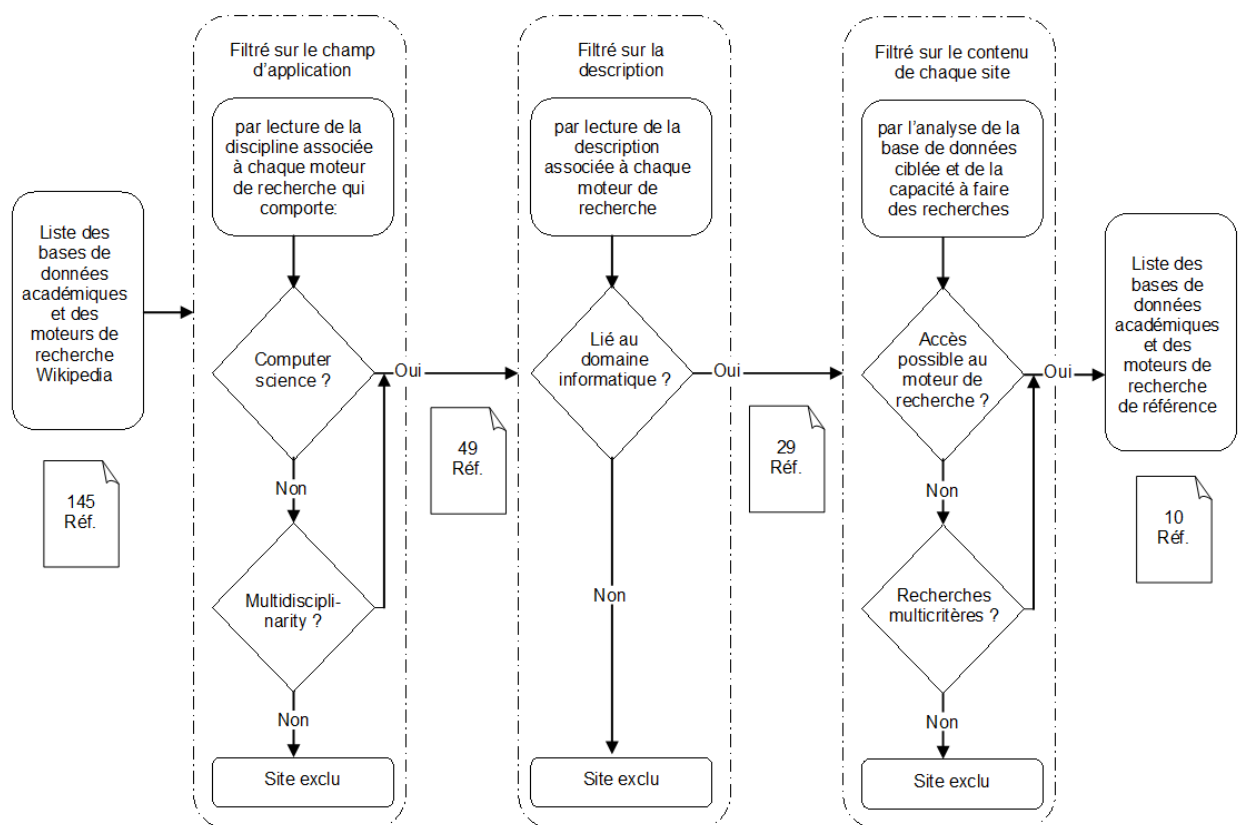


Figure 2 : Méthode de sélection des bases de données d'informations scientifiques

La figure 2 montre les différentes étapes qui ont permis de sélectionner les bases de données servant à la recherche d'articles. Au terme de cette dernière sélection, le Tableau 1 reprend les 10 moteurs de recherche qui ont été retenus pour effectuer le travail d'acquisition d'articles.

Tableau 1 : Liste des moteurs de recherche retenus après analyse des caractéristiques et du contenu des bases de données. Source: adapté de Wikimedia Foundation Inc., 2020

	Name	Discipline(s)	Description	Références obtenues
1	arXiv	Physics, Mathematics, Computer science, Nonlinear sciences, Quantitative biology and Statistics	Repository of electronic pre-prints of papers in the fields of mathematics, physics, astronomy, computer science, quantitative biology, statistics, and quantitative finance.	0
2	ASCE Library	Civil Engineering	all civil engineering disciplines including structural engineering, geotechnical engineering, transportation engineering, construction engineering, environmental engineering, engineering mechanics, sustainability, water resources, irrigation. hydraulics, hydrology, waterways, urban planning, cold regions...	5
3	Association for Computing Machinery Digital Library	Computer Science, Engineering		0
4	DeepDyve	Multidisciplinary	Free multidisciplinary search engine and reference organization tools, with subscription option for access to read-only content from more than 17,000 journals and 20 million articles	26

	Name	Discipline(s)	Description	Références obtenues
5	DBLP	Computer science	Comprehensive list of papers from major computer science conferences and journals	0
6	Google Scholar	Multidisciplinary		5
7	IEEE Xplore	Computer Science, Engineering, Electronics		12
8	Inspec	Physics, Engineering, Computer Science	The leading bibliographic database providing abstracts and indexing to the world's scientific and technical papers in physics, electrical engineering, electronics, communications, control engineering, computing, information technology, manufacturing, production, and mechanical engineering.	3
10	Science Direct	Science including Medicine		11
11	Scopus	Multidisciplinary	Scopus is the world's largest abstract and citation database of peer-reviewed research literature. It contains over 20,500 titles from more than 5,000 international publishers. While it is a subscription product, authors can review and update their profiles via ORCID.org or by first searching for their profile at the free Scopus author lookup page.	20
			Total	82

2.3 Sélection des articles

A partir de l'expression des mots clés, le résultat des recherches dans les bases de données retenues (annexe A.1) fournit un total de 82 articles. Après suppression de 23 doublons, on compte 59 références d'articles différents. A ce stade, c'est un parcours manuel qui permet de sélectionner les articles qui vont servir à l'élaboration de l'état de l'art. Une première étape consiste à sélectionner les articles qui sont en rapport avec le contexte de l'étude après la lecture du titre et du résumé de chacun d'eux. 30 articles n'ont pas été gardés parce qu'ils ne répondent pas à la question de recherche qui porte sur la gestion par la Belgique des équipements électriques et électroniques dans le contexte des sciences informatiques. Les critères d'exclusion qui ont servi à écarter des articles sont les suivants:

- 14 articles ressortent du domaine des sciences appliquées: 10 articles portent sur les méthodes chimiques de gestion des DEEE et 4 articles portent sur le recyclage spécifique des batteries.
- 1 article ressort du domaine de la géologie.
- 2 articles sont spécifiques à l'étude des panneaux photovoltaïques.
- 1 article porte sur le recyclage des télévisions.
- 10 articles sont des études de pratiques de recyclage dans des pays étrangers à la Belgique.
- 4 articles sont hors sujet.

A partir de ces 27 articles restants, une deuxième phase d'analyse consiste à tenter de télécharger les articles pour vérifier l'intérêt du contenu. 12 articles ont été exclus pour les raisons suivantes:

- 6 articles sont indisponibles.
- 3 références d'articles pointent vers des forums de discussion.
- 2 références d'articles pointent vers des pages Internet de présentations d'orateurs de conférences.
- 1 article reprend des données obsolètes de quantité de DEEE.

Au final, ce sont les 15 articles du Tableau 1 qui ont été retenus pour constituer l'état de l'art.

Tableau 2 : Liste des articles sélectionnés

Référence bibliographique	Titre	Auteurs	Année de publication
[1]	A Comparative Assessment of WEEE Collection in an Urban and Rural Context: Case Study on Desktop Computers in Belgium	Gonda, Louise, et al.	2019
[2]	Forecasting the Recycling Potential Based on Waste Analysis: A Case Study for Recycling Nd-Fe-B Magnets from Hard Disk Drives	Peeters, Jef R., et al.	2018
[3]	End-of-Life Management of Computers in Brussels: Environmental Comparison of Two Treatment Chains	Gonda, Louise, et Marc Degrez.	2018
[4]	Improvement Potential of Today's WEEE Recycling Performance: The Case of LCD TVs in Belgium	Vanegas, Paul, et al.	2017
[5]	Resource Savings by Urban Mining: The Case of Desktop and Laptop Computers in Belgium	Van Eygen, Emile, et al.	2016
[6]	Optimising Waste from Electric and Electronic Equipment Collection Systems: A Comparison of Approaches in European Countries	Friege, Henning, et al.	2015
[7]	Synergizing Industrialized and Developing Countries to Improve Resource Recovery for e-Waste: Case Study Belgium-Kenya	Vanegas, Paul, et al.	2014
[8]	Using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment in Decision Support: A Case Study on WEEE Valorization in Belgium	De Meester, Steven, et al.	2019
[9]	An assessment of resource conservation in WEEE management from a life cycle perspective: a case study of E-scrap recycling in Belgium	Tran, Van Eygena, et al.	-
[10]	Influence of MSW Landfill on Surrounding Geological Environment and Control Strategies	Li, F., Wu, J., & Dong, Z.	2010
[11]	Electronic waste and organized crime-assessing the	Trends in	2009

	links	Organized Crime	
[12]	Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review	Jones, P. T., et al.	2013
[13]	International Environmental Law in an Era of Globalized Waste	Barsalou, O., & Picard, M. H.	2018
[14]	Green SoCs for a sustainable Internet-of-Things	Bol, et al.	2013
[15]	Pressure-triggered active fasteners: Design results using topology optimization	Willems, B., Dewulf, W., & Duflou, J. R.	2007

2.4 Analyse quantitative

La lecture des articles montre que la question des DEEE en Belgique s'étend sur plusieurs domaines. Pour en faciliter l'analyse, une première action consiste à regrouper les articles qui portent sur des thèmes communs. L'analyse quantitative va permettre de créer des catégories permettant de regrouper les articles qui ont des thématiques semblables.

L'opération consiste à quantifier la fréquence des mots contenus dans les articles. L'analyse des mots dont la fréquence est la plus grande va permettre de déterminer les catégories regroupant plusieurs articles.

A l'aide d'outils Internet¹, le nombre d'itérations des mots est mesuré pour chaque article. Pour chacun d'eux, on sélectionne les noms communs en rapport avec le contexte de l'étude parmi les 5 mots les plus courants. On ajoute à cette liste les mots clés de l'expression de recherche.

Des abréviations sont utilisées pour obtenir toutes les formes de déclinaisons de certains mots, c'est le cas de *belgium*, *wallonia*, *recycling* et *disassembling*, qui sont respectivement remplacés par *belgi*, *wallo*, *recycl* et *disassembl*. Au terme de cette recherche, on obtient une liste de 17 mots ou abréviations:

waste (et ses synonymes); recycl; material; landfill; collect; environment; metal; computer; belgi; desktop; equipment; plastic; emission, pollution; disassembl; flanders; wallo.

¹ Compteur de mots en ligne : <https://www.textfixerfr.com/>; Analyseur de textes et de mots : <https://www.lexicool.com/>

Le Tableau 3 reprend le compte de chacun de ces mots pour l'ensemble des articles. Dans ce tableau, la valeur maximale de chaque ligne a été mise en évidence. On constate que les différentes formules du mot *waste* sont celles qui dominent largement. Ceci n'est pas étonnant dans la mesure où ses déclinaisons font partie des mots clés et sont donc logiquement dans tous les articles.

Tableau 3 : Récurrence des mots les plus courants par article

	ref. article	total mots	[electronic] waste, ewaste, weee	recycl _	material	environment	collect	landfill	metal	belgi _	computer	equipment	desktop	plastic	emission	pollution	disassembl _	flanders	wallo
[1]	11545	216	52	38	7	197	2	0	63	174	27	135	0	0	0	0	0	0	23
[2]	12416	128	99	59	26	21	0	12	46	7	13	24	3	1	0	25	0	0	0
[3]	4716	75	36	29	25	16	8	12	20	39	17	11	6	1	0	0	0	0	3
[4]	9688	143	161	191	37	24	0	32	24	2	16	1	51	1	0	4	0	0	0
[5]	10439	108	147	121	22	31	26	56	14	18	17	43	18	0	0	1	0	0	0
[6]	6939	228	58	4	8	140	0	4	15	2	35	0	0	1	0	0	8	0	0
[7]	5408	60	59	50	34	0	7	41	10	4	8	2	32	9	0	11	0	0	0
[8]	9948	155	70	133	17	7	34	49	10	3	9	2	19	0	1	0	16	0	0
[9]	476	9	11	4	3	1	1	1	5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
[10]	5761	40	3	1	65	4	121	47	1	1	1	0	0	0	73	0	0	0	0
[11]	12925	352	115	24	47	18	15	17	3	22	21	1	6	1	23	2	0	0	0
[12]	11426	102	26	98	25	0	207	26	10	0	1	0	19	5	5	0	4	0	0
[13]	8747	310	35	9	120	3	0	3	2	3	8	0	8	2	19	0	0	0	0
[14]	3611	7	1	1	9	0	0	0	1	0	3	0	0	4	0	0	1	1	1
[15]	3708	4	2	15	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	44	1	0	0
	total	1937	875	777	445	462	421	300	226	275	177	219	163	25	121	87	30	27	

Tableau 4 : Nombre pour 1000 des mots les plus courants par article

réf. Article	[electronic] waste, ewaste, weee	recycl _	material	environment	collect	landfill	metal	belgi _	computer	equipment	desktop	plastic	emission	pollution	disassembl _	flanders	wallo _
[1]	18,7	4,5	3,3	0,6	17,1	0,2	0,0	5,5	15,1	2,3	11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
[2]	10,3	8,0	4,8	2,1	1,7	0,0	1,0	3,7	0,6	1,0	1,9	0,2	0,1	0,0	2,0	0,0	0,0
[3]	15,9	7,6	6,1	5,3	3,4	1,7	2,5	4,2	8,3	3,6	2,3	1,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,6
[4]	14,8	16,6	19,7	3,8	2,5	0,0	3,3	2,5	0,2	1,7	0,1	5,3	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0
[5]	10,3	14,1	11,6	2,1	3,0	2,5	5,4	1,3	1,7	1,6	4,1	1,7	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
[6]	32,9	8,4	0,6	1,2	20,2	0,0	0,6	2,2	0,3	5,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,2	0,0
[7]	11,1	10,9	9,2	6,3	0,0	1,3	7,6	1,8	0,7	1,5	0,4	5,9	1,7	0,0	2,0	0,0	0,0
[8]	15,6	7,0	13,4	1,7	0,7	3,4	4,9	1,0	0,3	0,9	0,2	1,9	0,0	0,1	0,0	1,6	0,0
[9]	18,9	23,1	8,4	6,3	2,1	2,1	2,1	10,5	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
[10]	6,9	0,5	0,2	11,3	0,7	21,0	8,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	12,7	0,0	0,0	0,0
[11]	27,2	8,9	1,9	3,6	1,4	1,2	1,3	0,2	1,7	1,6	0,1	0,5	0,1	1,8	0,2	0,0	0,0
[12]	8,9	2,3	8,6	2,2	0,0	18,1	2,3	0,9	0,0	0,1	0,0	1,7	0,4	0,4	0,0	0,4	0,0
[13]	35,4	4,0	1,0	13,7	0,3	0,0	0,3	0,2	0,3	0,9	0,0	0,9	0,2	2,2	0,0	0,0	0,0
[14]	1,9	0,3	0,3	2,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,8	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,3	0,3
[15]	1,1	0,5	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	11,9	0,3	0,0
moy.	15,3	7,8	6,2	4,2	3,5	3,4	2,6	2,3	2,0	1,6	1,4	1,3	0,3	1,1	1,1	0,2	0,2

Pour obtenir une vue objective de la récurrence des mots, le Tableau 4 présente la répétition des mots ramenée en proportion sur 1000 par rapport au total des mots par article. Des proportions sur 1000 facilitent la lecture comparativement au pourcentage qui amène à de nombreuses valeurs strictement décimales.

Cette fois, les valeurs maximales mises en évidence le sont sans prendre en compte la première colonne contenant les déclinaisons de *waste*. Ceci a pour objectif de ne pas créer une grande catégorie Waste regroupant la presque totalité des articles. A la lecture du Tableau 4, on peut envisager une première série de 8 catégories:

Recyclage; Matériel; Environnement; Décharge; Collecte; Ordinateur; Emission;
Désassemblage.

Pour réduire le nombre de catégories, une deuxième analyse porte sur les deuxièmes mots les plus fréquents, ce que nous appellerons les deuxièmes maximums. Dans le Tableau 5, ces deuxièmes maximums sont mis en évidence dans les cellules grisées. Cette seconde analyse permet de rassembler davantage les articles qui traitent de sujets communs. Elle permet également d'intégrer les articles seuls dans leur catégorie, dans des catégories composées de plusieurs articles.

Tableau 5 : Mise en évidence des premiers et deuxièmes maximums

réf. Article	[electronic] waste, ewaste, weee	recycl _	material	environnement	collect	landfill	metal	belgi _	computer	equipment	desktop	plastic	emission	pollution	disassembl _	flanders	wallo _
[1]	18,7	4,5	3,3	0,6	17,1	0,2	0,0	5,5	15,1	2,3	11,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
[2]	10,3	8,0	4,8	2,1	1,7	0,0	1,0	3,7	0,6	1,0	1,9	0,2	0,1	0,0	2,0	0,0	0,0
[3]	15,9	7,6	6,1	5,3	3,4	1,7	2,5	4,2	8,3	3,6	2,3	1,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,6
[4]	14,8	16,6	19,7	3,8	2,5	0,0	3,3	2,5	0,2	1,7	0,1	5,3	0,1	0,0	0,4	0,0	0,0
[5]	10,3	14,1	11,6	2,1	3,0	2,5	5,4	1,3	1,7	1,6	4,1	1,7	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
[6]	32,9	8,4	0,6	1,2	20,2	0,0	0,6	2,2	0,3	5,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,2	0,0
[7]	11,1	10,9	9,2	6,3	0,0	1,3	7,6	1,8	0,7	1,5	0,4	5,9	1,7	0,0	2,0	0,0	0,0
[8]	15,6	7,0	13,4	1,7	0,7	3,4	4,9	1,0	0,3	0,9	0,2	1,9	0,0	0,1	0,0	1,6	0,0
[9]	18,9	23,1	8,4	6,3	2,1	2,1	2,1	10,5	0,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
[10]	6,9	0,5	0,2	11,3	0,7	21,0	8,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	12,7	0,0	0,0	0,0
[11]	27,2	8,9	1,9	3,6	1,4	1,2	1,3	0,2	1,7	1,6	0,1	0,5	0,1	1,8	0,2	0,0	0,0
[12]	8,9	2,3	8,6	2,2	0,0	18,1	2,3	0,9	0,0	0,1	0,0	1,7	0,4	0,4	0,0	0,4	0,0
[13]	35,4	4,0	1,0	13,7	0,3	0,0	0,3	0,2	0,3	0,9	0,0	0,9	0,2	2,2	0,0	0,0	0,0
[14]	1,9	0,3	0,3	2,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,8	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,3	0,3
[15]	1,1	0,5	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	11,9	0,3	0,0
moy.	15,3	7,8	6,2	4,2	3,5	3,4	2,6	2,3	2,0	1,6	1,4	1,3	0,3	1,1	1,1	0,2	0,2

A la lecture du Tableau 5, on peut observer que dans la colonne *material*, les articles [4] et [8], où la valeur est la plus élevée, s'accompagnent toujours d'un deuxième

maximum qui fait partie de la colonne *recycl*. C'est également le cas dans l'autre sens pour 3 articles sur 5 de la colonne *recycl*. On peut donc en conclure que ces éléments sont étroitement liés et regrouper les articles dans la seule catégorie Recyclage.

Dans les colonnes *environmental*, *collect* et *landfill*, on trouve chaque fois 2 premiers maximums accompagnés de deuxièmes maximums respectivement distincts. Ce qui signifie qu'il n'y a pas de regroupement logique possible, on doit donc garder 3 catégories indépendantes pour la suite de l'analyse de la littérature: Environnement, Décharge et Collecte.

Pour l'article [3] qui est le seul où la valeur *computer* est première maximale, on peut inscrire cet article dans la catégorie Recyclage sur base du deuxième maximum qui se trouve dans la colonne *recycl*.

Enfin, pour l'article [15], le deuxième maximum se trouve dans la catégorie *material* qui a été associée à *recycl*. Cet article intégrera la catégorie Recyclage pour la suite de l'analyse de la littérature.

Le résultat de l'analyse de l'ensemble des tableaux nous permet de conserver 4 catégories:

Tableau 6 : Répartition des articles par catégorie établie

	Catégories	Articles
1	Recyclage	[2] [3] [4] [5] [7] [8] [9] [11] [15]
2	Environnement	[13] [14]
3	Décharge	[10] [12]
4	Collecte	[1] [6]

2.5 Analyse et synthèse de la littérature scientifique

L'analyse quantitative a permis de dégager 4 thématiques permettant de regrouper les articles de la littérature portant sur le thème de la prise en charge des déchets électroniques en Belgique. Les différents aspects portent sur le recyclage, la collecte, l'enfouissement en décharge et l'impact environnemental.

2.5.1 Le recyclage

Cette catégorie regroupe les 9 articles scientifiques ci-dessous, qui parlent du recyclage des DEEE.

- 1) [2] Peeters et al., 2018, *"Forecasting the recycling potential based on waste analysis: A case study for recycling Nd-Fe-B magnets from hard disk drives"*

Peeters et al. présentent une méthodologie permettant d'évaluer le potentiel de recyclage des disques durs. Ils précisent que cette méthodologie peut être utilisée pour prévoir le potentiel de recyclage sur base d'échantillonnage des déchets. Les résultats démontrent que l'adoption de systèmes avancés de désassemblages automatisés est rentable et permet de récupérer plus de matériaux, ce qui réduit l'impact environnemental et la criticité de matériaux spécifiques comme les terres rares. L'analyse effectuée démontre également que la viabilité économique des systèmes de démontages automatisés avancés pour les disques durs dépend fortement de la valeur des matériaux récupérés, du coût de la main-d'œuvre et de la capacité annuelle de récupération.

- 2) [3] Gonda et al., 2018, *"End-of-life Management of Computers in Brussels: Environmental Comparison of Two Treatment Chains"*

Dans leur recherche, Gonda et al. comparent les impacts environnementaux de deux chaînes existantes de traitement des ordinateurs en fin de vie à Bruxelles. La première est une chaîne de traitement des déchets conventionnelle gérée par l'association chargée de respecter l'obligation de reprise pour le compte des fabricants en Belgique. La seconde est gérée par les entreprises sociales d'insertion (WISE) qui privilégient la réutilisation et un démantèlement manuel plus approfondi des DEEE avant traitement mécanique. Pour chaque chaîne, les impacts liés aux traitements utilisés et les bénéfices

générés par la récupération des matériaux sont évalués. Les résultats montrent que la chaîne gérée par WISE, qui privilégie la réutilisation des ordinateurs et le démontage manuel, conduit à un taux de récupération des matériaux plus élevé. Il en résulte une amélioration des bénéfices environnementaux jusqu'à 69 %. Gonda et al. concluent que si la chaîne conventionnelle augmente son taux de collecte au détriment de WISE, les avantages environnementaux mondiaux du traitement des DEEE diminueront. Ils ajoutent que pour améliorer les performances environnementales, l'activité de WISE, et notamment la réutilisation et le démontage manuel, devraient être promus.

3) [4] *Vanegas et al., 2017, "Improvement potential of today's WEEE recycling performance: The case of LCD TVs in Belgium"*

Dans leur article de 2017, Vanegas et al. rendent compte d'une étude portant sur l'analyse de l'efficacité de recyclage des écrans LCD. Dans leur étude, ils évaluent les performances de séparation des matériaux d'une usine de recyclage en Belgique. Dans cette usine, le traitement primaire des équipements se fait par déchiquetage. Les résultats présentés montrent que cette technique offre des performances élevées pour les métaux ferreux et l'aluminium. Par contre, l'étude démontre qu'environ un tiers des matières plastiques sont recyclées alors qu'elles composent plus de 57 % des composants des écrans LCD. Vanegas et al. estiment que pour les plastiques, au niveau national, le potentiel d'amélioration représentait 3,3 millions d'euros en 2016 et peut être estimé à 6,8 millions d'euros pour 2025. Ils indiquent que l'amélioration de l'efficacité de recyclage et de la qualité des matériaux récupérés peut être obtenue en utilisant des étapes de démontage manuel. Ils font également remarquer que certains matériaux et additifs contenus dans les matières plastiques sont difficiles à identifier, rendent complexe l'amélioration des processus de recyclage et réduisent la quantité de plastique réutilisé comme matière première secondaire.

4) [5] *Van Eygen et al., 2016, "Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium"*

Dans cet article, les performances de la chaîne de recyclage des ordinateurs et des portables en Belgique sont évaluées. L'accent est porté sur la récupération des métaux et en particulier des métaux précieux et des terres rares, en abondance dans ce type de

matériel. Van Eygen et al. précisent qu'une étape de démontage manuel permet d'améliorer l'efficacité de la récupération des métaux et plus spécifiquement des métaux précieux. Les résultats de l'étude montrent que la consommation de ressources naturelles dans le système de recyclage est beaucoup plus faible que dans un scénario de mise en décharge, où les matériaux doivent être générés à partir de ressources naturelles vierges. Globalement, le recyclage économise respectivement 80 et 87 % des ressources naturelles dans le cas des ordinateurs de bureau et des ordinateurs portables.

5) [7] *Vanegas et al., 2014, "Synergizing industrialized and developing countries to improve resource recovery for e-waste: Case study Belgium - Kenya"*

Dans leur article de 2014, Vanegas et al. analysent un programme de coopération entre la Belgique où se trouvent une usine de recyclage de premier niveau et une raffinerie de métaux de haute technologie, et l'usine pilote de recyclage «WEEE Center» au Kenya. En combinant le démontage et le tri manuels dans des pays émergents où la main d'œuvre est moins chère, avec un traitement final de pointe dans les pays industrialisés, la coopération internationale pour le traitement des DEEE offre de grandes opportunités pour améliorer significativement la récupération des composants de manière efficace. D'autre part, l'étude montre que pour certains DEEE comme les unités centrales, le bénéfice économique peut atteindre 60 % en mettant en œuvre un scénario avec une coopération internationale. En plus, d'après les auteurs, cette manière de faire devrait avoir un impact social positif par la création d'emplois dans les pays en développement. Toutefois, les auteurs insistent sur le fait que des normes minimales de traitement des DEEE dans les pays émergents doivent être mises en place pour encadrer les conditions de travail et minimiser l'impact environnemental.

6) [8] *De Meester et al., 2019, "Using material flow analysis and life cycle assessment in decision support: A case study on WEEE valorization in Belgium"*

L'objectif de cette étude est d'offrir aux responsables chargés de prendre les décisions en termes de gestion des DEEE, un outil leur permettant d'avoir des informations sur les performances environnementales de leurs futures décisions. De Meester et al. proposent un cadre mathématique permettant aux décisionnaires d'être efficaces pour évaluer les effets potentiels de certains arbitrages. Ce cadre peut mettre en évidence le

changement de paramètres qui entraînera le gain le plus important de réutilisation/recyclage et ainsi aider à atteindre les objectifs de recyclage. Il peut également montrer l'effet indirect des décisions, par exemple comment les flux peuvent évoluer plus loin dans la chaîne de valorisation si une nouvelle technologie est promue plus tôt dans la chaîne.

7) [9] *Tran et al., 2016, "An assessment of resource conservation in WEEE management from a life cycle perspective: a case study of E-scrap recycling in Belgium"*

Cette publication est la synthèse de la présentation d'une étude menée par Tran et al., et présentée à Montpellier en 2016. Dans cette étude, les auteurs mettent l'accent sur le fait que les divisions "petits équipements" et "petits équipements informatiques et de télécommunications", représentent 39 % de l'ensemble des DEEE, soit la partie la plus importante des 5 catégories que comportent les DEEE. Pour ce type d'équipements, l'analyse de la consommation des ressources naturelles du système de recyclage montre que les métaux de base tels que les métaux ferreux, l'aluminium et le cuivre sont recyclés à raison de 96 %. Par ailleurs, le recyclage s'effectue principalement en Europe (91 %), y compris en Belgique à hauteur de 7 %, et donc favorise la circulation de ces matières au sein de l'économie européenne. L'étude révèle que le traitement secondaire (fusion, etc.) représente l'étape la plus exigeante en ressources de toute la chaîne de recyclage. Elle contribue à plus de 96 % de la consommation totale de ressources.

8) [11] *Trends in Organized Crime, 2009, "Electronic waste and organized crime- assessing the links"*

Cet article du magazine Trends in Organ Crim fait le compte rendu du rapport d'Interpol publié en 2009 sur le commerce illégal de déchets électroniques. L'élaboration de ce rapport a été faite en coopération avec des représentants du Programme des Nations Unies pour l'environnement et les forces de police de 9 pays dont la Belgique. L'étude se concentre sur l'exportation illégale des déchets électroniques vers les pays en développement. Dans ces pays, la grande majorité des déchets électroniques finissent dans des décharges, des incinérateurs ou des installations de recyclage mal équipées. Ces activités se font dans des conditions insalubres et parfois dangereuses. Malheureusement, les bénéfices importants engendrés par la

revente des déchets électroniques ont fait en sorte de voir se développer des organisations criminelles peu scrupuleuses des normes internationales sur la gestion des déchets électroniques, et peu regardantes sur la manière dont ces déchets sont traités. Le rapport propose des pistes pour remédier à ce problème. Pour l'Europe, les recommandations sont les suivantes:

- renforcement des enquêtes criminelles liées au commerce des DEEE;
- amélioration de la réglementation;
- sensibilisation des acteurs qui génèrent des DEEE sur la destination des produits en fin de vie;
- mise en place d'une politique de retour d'équipements détectés comme illégalement importés dans des pays émergents.

9) [15] *Willems et al., 2007, "Pressure-triggered active fasteners: Design results using topology optimization"*

Cette étude, menée par l'université de Leuven, porte sur des techniques spécifiques de démontage des fixations dans les produits électroniques. L'objectif est d'améliorer l'efficacité du démontage automatisé par différents procédés (pression, thermique, etc.). L'étude amène à proposer des conceptions d'attaches et suggère une optimisation de la configuration interne des équipements, qui améliorerait et faciliterait le démontage. Les calculs obtenus montrent une augmentation de l'efficacité atteignant dans certains cas les 200 %.

Synthèse des articles

Le recyclage des équipements électroniques se déroule en plusieurs étapes: un tri, un traitement primaire où les appareils sont démontés et les matériaux sont séparés, suivi d'un traitement final qui est effectué pour produire des matières premières secondaires.

Dans un premier temps, les appareils électriques et électroniques mis au rebut sont collectés et triés. Ils sont d'abord vérifiés et l'équipement qui peut être réutilisé est réparé, remis à neuf ou nettoyé. Van Eygen et al. [5] indiquent que la réutilisation efficace des produits mis au rebut peut contribuer à d'importantes économies de

ressources lors du remplacement de l'achat d'un nouveau produit. Ils ajoutent qu'il est donc utile de réutiliser des appareils qui sont en bon état.

Cependant, la réutilisation d'équipements plus anciens dont les performances ne sont pas toujours garanties peut retarder l'introduction de nouveaux produits plus économes en énergie. Pour cette raison, le potentiel de réutilisation des DEEE rejetés par les consommateurs a été relativement limité. Ils déclarent que, dans l'ensemble, les études ont montré que l'effet d'une collecte et d'un recyclage efficaces sur les économies de ressources réalisées est beaucoup plus élevé que la réutilisation, car tous les produits doivent finalement se retrouver dans un système de recyclage.

La deuxième étape est le traitement primaire, où les appareils sont démontés et les matériaux sont séparés pour les traiter indépendamment. Cette étape est cruciale dans la chaîne de recyclage globale, car elle détermine dans quelle mesure les matériaux sont guidés vers l'étape de traitement final appropriée pour le recyclage.

En raison des coûts de main d'œuvre élevés, les entreprises chargées de la reconversion des déchets électroniques en Belgique comme dans l'ensemble des pays industrialisés, privilégient des procédés automatisés pour ce traitement primaire. La méthode consiste à réduire la taille des produits de façon mécanique par un système de déchiquetage, et ensuite séparer les éléments obtenus de manière automatisée. Dans leur étude, Peeters et al. démontrent que comparativement à l'importation de matières premières primaires, l'adoption de systèmes avancés de démantèlement automatisé est aujourd'hui rentable et permet de récupérer assez de matériaux que pour réduire le coût et l'impact environnemental. A titre de comparaison, la production d'aluminium secondaire nécessite 90 à 95 % d'énergie en moins par rapport à la production primaire par extraction minière [8].

Avec un taux de récupération de 96 % [9], le traitement automatisé se montre particulièrement efficace pour isoler les métaux ferreux, l'aluminium et le cuivre mais cette technique fonctionne très mal pour les métaux précieux et les plastiques, bien que ces derniers représentent en moyenne plus du quart des DEEE comme indiqué dans le Tableau 7. La principale raison de ces mauvaises performances est due aux limites techniques du déchiquetage mécanique et du tri automatisé qui conduisent à une libération et une séparation imparfaites, entraînant des fractions impures et la perte inévitable de matériaux. Van Eygen et al. mentionnent qu'une amélioration de l'efficacité de récupération et de la qualité des matériaux secondaires produits peut être obtenue en utilisant préalablement des étapes de démontage manuel. Ils ajoutent que des améliorations vers une étape de démontage plus avancée permettraient

d'augmenter l'efficacité de récupération des métaux précieux, bien que les avantages environnementaux et économiques supplémentaires qui en résultent doivent être mis en balance avec l'augmentation des coûts économiques. Gonda et al. indiquent qu'un démantèlement manuel plus approfondi des DEEE avant traitement mécanique offre un avantage environnemental pouvant aller jusqu'à 69 %.

Dans leur article, De Meester et al. démontrent qu'à l'heure actuelle, seuls 32 % des matériaux DEEE sont recyclés vers des applications haut de gamme, tandis que 68 % sont perdus dans les applications bas de gamme comme matériaux de construction, décharges ou incinération. Ils font remarquer que les matériaux les plus précieux sur le plan économique (par kg de matériau), tels que l'or et le palladium, se retrouvent principalement dans des applications bas de gamme. La raison principale en est que, souvent, seules de petites concentrations de ces métaux précieux sont utilisées et qu'il est donc difficile d'optimiser l'automatisation des processus de séparation spécifiques au métal, à moins qu'ils ne puissent être séparés lors d'un démontage manuel.

Pour remédier à ce problème du coût de main d'œuvre, Vanegas et al. proposent de mettre en place le programme de coopération internationale de la StEP Initiative¹, qui vise à parvenir à une solution durable pour les DEEE dans les pays en développement, en combinant un prétraitement local (démontage manuel) et un traitement final de pointe dans les pays industrialisés. En combinant le démontage et le tri manuels avec un traitement final de pointe, la coopération internationale pour le traitement des DEEE offre de grandes opportunités pour améliorer significativement la récupération des ressources de manière durable. Cependant, des mesures doivent être prises afin d'établir des normes minimales de traitement des DEEE dans ces pays émergents pour ne pas accroître l'impact environnemental lié à des pratiques peu soucieuses de l'environnement.

La dernière étape est le traitement final, qui est effectué pour produire des matières premières secondaires. Les déchets de fer, de cobalt, d'aluminium, de magnésium, de cuivre, ainsi que des fractions riches en métaux tels que l'acier et les pyralènes, sont envoyés aux fonderies respectives. Ensuite, les polymères plastiques sont séparés et transformés en pastilles plastiques secondaires. Les batteries sont envoyées dans des unités de recyclage spécifiques [5]. Le reste est principalement intégré dans des matériaux de construction. Enfin, ce qui ne peut pas être valorisé est mis en décharge ou incinéré. De Meester et al. font la remarque que malheureusement, comme le

¹ Solving the E-waste Problem, <http://www.step-initiative.org/>

traitement primaire est essentiellement mécanique, les performances en matière de récupération sont moins importantes qu'on ne pourrait l'espérer. Par exemple, le fer a une efficacité de séparation de 99 % et de traitement secondaire très élevé de l'ordre de 90 %, mais en raison du fait que 53 % des DEEE finissent toujours dans la fraction de déchets mélangés suite au déchiquetage, la récupération totale de fer haut de gamme ne dépasse pas 51 %.

Tableau 7 : Composition et valeur potentielle des matières premières du flux mondial de DEEE en 2016 [21]

Material	Mass/10 ⁶ kg	Potential value/10 ⁶ €	Potential value/%
Fe	16 283	3 582	7%
Cu	2 164	9 524	17%
Al	2 472	3 585	7%
Ag	1.6	884	2%
Au	0.5	18 840	34%
Pd	0.2	3 369	6%
Plastics	12 230	15 043	27%
Other	11 550	–	0%
Total	44 700	55 000	100%

2.5.2 Impact environnemental

En plus d'informations trouvées dans de nombreux articles, deux d'entre eux ont mis l'accent sur l'impact environnemental lié à la gestion des déchets électriques et électroniques. Il s'agit des publications de Barsalou et Picard, et de Bol et al.

- 1) [13] Barsalou, O., & Picard, M. H. (2018), *"International Environmental Law in an Era of Globalized Waste"*

Dans leur étude, Barsalou et Picard ont mis en évidence que la législation internationale concernant les déchets s'est considérablement transformée au fil du temps. D'une volonté de préservation de l'environnement dans les premières conventions datant des années 1970, on est passé à un droit international considérant les déchets comme une marchandise mondiale. Cette transformation permet leur circulation et leur redistribution dans le monde et remplace la valeur négative des déchets en une valeur positive recyclée dans l'économie mondiale. De nos jours,

l'objectif principal n'est plus la protection de l'environnement mais la marchandisation des déchets. Le droit international qualifie les déchets comme des produits qui circulent entre les pays exportateurs et importateurs en fonction de leur valeur relative.

Ce cadre juridique a amené certains pays comme le Niger, la Chine et l'Inde à se spécialiser dans le recyclage des déchets électroniques pour en extraire les nombreuses matières de valeur qu'ils contiennent. Toutefois, Barsalou et Picard font remarquer que les déchets électroniques ne s'écoulent pas exclusivement des pays d'Amérique du Nord et d'Europe vers les pays d'Afrique et d'Asie. A titre d'exemple, ils font remarquer que la Belgique est le principal destinataire des déchets électroniques en provenance de l'Inde. Ils estiment que cela représente plus de 92 % des exportations de déchets électroniques de l'Inde. Ils considèrent que c'est lié au fait que la Belgique est le siège d'une importante fonderie, Umicore, qui traite les déchets électroniques dans le cadre de ses matières premières pour l'extraction des métaux précieux.

Ce mécanisme d'exportation engendre un double impact sur l'environnement. D'une part, cette pratique occasionne des dommages liés aux transferts des matériaux sur de longues distances en ce qui concerne la pollution de l'air et le réchauffement climatique. D'autre part, dans les pays d'Afrique et d'Asie, les déchets électroniques sont traités sans prendre les mesures de protection environnementale suffisantes à leur recyclage.

2) [14] Bol et al., 2013, *"Green SoCs for a sustainable Internet-of-Things"*

Dans leur étude menée à l'Université Catholique de Louvain, Bol et al. misent sur l'introduction d'une prise en compte des aspects environnementaux en ce qui concerne les équipements et les applications des réseaux de capteurs sans fil constituant Internet. Ils préconisent pour la conception de choisir des composants électroniques moins énergivores et moins toxiques lorsque les équipements deviennent des déchets électroniques.

Ils recommandent l'utilisation de techniques de traitements locaux des données permettant de réduire le trafic Internet et par conséquent, la consommation énergétique des équipements durant leur fonctionnement.

Dans cette catégorie qui regroupe les articles qui portent sur l'environnement, le sujet est abordé de deux manières différentes au sein des deux articles qui la constituent. Barsalou et Picard mettent en parallèle les problématiques environnementales avec le droit international portant sur le commerce des déchets. Tandis que l'étude de Bol et al. est consacrée à un domaine spécifique qui est celui des équipements électroniques sans fil constituant Internet. Ils ont en commun la volonté de mettre en avant les préoccupations environnementales dans leur domaine respectif.

2.5.3 Mise en décharge

Le sujet de la mise en décharge est régulièrement abordé dans les articles et en particulier les articles qui portent sur le recyclage des DEEE mais Li et al., et Jones et al., ont particulièrement axé leur étude sur les impacts environnementaux liés à la mise en décharge.

1) [10] *Li et al., 2010, "Influence of MSW Landfill on Surrounding Geological Environment and Control Strategies"*

Li et al. ont axé leur étude sur l'influence des décharges de déchets solides sur leur environnement géologique limitrophe. Le principal facteur de pollution est le lixiviat issu de la percolation des eaux de pluie sur les métaux lourds et les autres substances nocives, entassés dans les décharges. Une mauvaise manipulation de ce lixiviat provoque une grave pollution des eaux de surface et souterraines, de l'air et des sols adjacents. Les auteurs indiquent que les métaux lourds proviennent principalement de déchets d'équipements électriques ou électroniques (batteries, circuits imprimés...).

Pour éviter ce problème, les auteurs proposent plusieurs recommandations:

- choisir un site d'enfouissement loin de sources d'eau avec, de préférence, un sol peu perméable;
- prévoir un système anti-infiltration au fond des décharges pour éviter les fuites de lixiviat;
- concevoir un système de collecte des lixiviats pour les drainer et les nettoyer;

- surveiller les eaux souterraines afin de détecter les impacts des lixiviats et d'en réduire la toxicité.

Pour les sites déjà contaminés, les auteurs proposent comme solutions de:

- réduire la propagation de la pollution du lixviat par pompage ou injection d'eau;
- former une couche imperméable sur le site pour réduire l'infiltration;
- utiliser des barrières verticales en aval ou en amont de la décharge pour contrôler la migration des polluants et empêcher la contamination géologique avoisinante.

2) [12] Jones et al., 2013, *"Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review"*

Dans cet article, Jones et al. analysent les conditions dans lesquelles l'exploitation minière améliorée par la récupération de matériaux provenant de déchets électroniques, tels les métaux rares, est rentable économiquement et bénéfique en terme de réduction d'impact environnemental. L'étude a été menée à partir des résultats des travaux menés en Flandre par un consortium d'experts pour valoriser la décharge d'enfouissement de REMO au nord d'Hasselt. En croisant les informations obtenues et différentes études internationales portant sur les activités minières, les résultats confirment la faisabilité d'une revalorisation du contenu des décharges par l'utilisation de techniques de transformation innovantes et intégrées. L'étude montre que l'exploitation minière avancée génère plusieurs effets environnementaux positifs comme la réduction de production de CO₂, une restauration progressive de l'écosystème après l'activité d'extraction des décharges. L'utilisation du CO₂ et de la chaleur produits par les usines de traitement de déchets permet aussi la réduction de l'empreinte carbone par la réduction de la consommation de combustibles fossiles.

La consommation de ressources naturelles dans le système de recyclage est beaucoup plus faible que dans un scénario de mise en décharge, où les matériaux doivent être générés à partir de ressources naturelles vierges. Toutefois, Li et al. indiquent que les résidus du traitement de recyclage des DEEE qui sont conduits en décharge sont en partie responsables de la contamination des sols par des métaux lourds. On trouve principalement le mercure, le cadmium, le plomb et d'autres avec une toxicité biologique importante, comme l'arsenic métalloïde, le zinc, le cuivre, le cobalt, le nickel et l'étain.

C'est le mécanisme de lixiviation qui est le vecteur par lequel les métaux lourds contaminent le sol. Le lixiviat est le liquide résiduel engendré par la percolation de l'eau et des liquides à travers une zone de stockage de déchets. Riches en matières organiques et en éléments traces (métaux lourds, polluants organiques et chimiques...), ces lixiviats ne peuvent être rejetés directement dans le milieu naturel et doivent être soigneusement collectés et traités [10].

En Belgique, la décharge d'enfouissement de REMO est opérationnelle depuis le début des années 1970. Ce site couvre une superficie de 130 ha et est situé à proximité directe des villages d'Heusden-Zolder, d'Helchteren et d'Houthalen. Il est entouré d'un ancien tas de scories de mine de charbon, d'une zone d'entraînement militaire et de l'une des principales réserves naturelles de Flandre. Pour éviter une contamination des eaux de surface et des eaux souterraines par lixiviation, Jones et al. préconisent l'excavation et la valorisation des déchets mis en décharge en tant que matériaux et énergie en utilisant des technologies de transformation innovantes. Ils indiquent qu'en combinant la valorisation des matériaux avec la production d'énergie et la réutilisation des terres, la récupération rentable des ressources des décharges génère des retombées économiques et réduit la pollution de l'environnement géologique entourant les décharges.

Toutefois, ils précisent que l'exploitation minière améliorée des décharges nécessite des prises de décisions politiques stratégiques et des systèmes de soutien adaptés, y compris des incitations combinées pour le recyclage des matériaux, l'utilisation de l'énergie et la restauration de la nature.

2.5.4 La collecte

De nombreux articles et en particulier les articles qui portent sur les techniques de recyclage abordent le sujet de la collecte mais deux en particulier ont centré leur étude sur ce sujet. Il s'agit des articles de Gonda et al. et Friege et al.

- 1) [1] *Gonda et al., 2019, "A comparative assessment of WEEE collection in an urban and rural context: Case study on desktop computers in Belgium"*

L'étude de Gonda et al. a pour objectif de mettre en évidence les différences de flux de collectes des DEEE selon la typologie régionale. Pour ce faire, les auteurs font la comparaison entre la collecte des ordinateurs de bureau de deux régions distinctes mais voisines, la Région Bruxelles-Capitale, de typologie urbaine, et la Région wallonne, considérée comme une zone avec une typologie mixte urbaine-rurale. Pour les deux régions, l'étude analyse et compare les quantités d'ordinateurs de bureau récupérés provenant des entreprises et des ménages. En matière de recyclage, la recherche a montré qu'il existait deux types de filières: un canal de recyclage conforme géré en Belgique par Recupel et des chaînes non conformes pour lesquelles les quantités de matériels collectés sont basées sur des estimations en raison de données manquantes car cette filière est trop peu documentée. L'analyse montre que les tendances en matière de collecte d'ordinateurs de bureau dans les entreprises sont similaires pour les deux régions mais que la quantité d'ordinateurs de bureau qui sont capturés par des filières non conformes est plus importante en Région bruxelloise. Les auteurs estiment que cela est lié au nombre de parc à conteneurs plus important par habitant en Wallonie qu'à Bruxelles mais aussi que le passage aux parcs à conteneurs est plus ancré dans les habitudes de la population dans les zones rurales. Ils préconisent le renfort des infrastructures conventionnelles permettant la collecte du matériel informatique auprès des entreprises en Région Bruxelles-Capitale pour éviter les flux dans des canaux non conformes plus importants en Région Bruxelles-Capitale qu'en Wallonie.

- 2) [6] *Friege et al., 2015, "Optimising waste from electric and electronic equipment collection systems: A comparison of approaches in European countries "*

Dans leur étude, Friege et al. comparent les pratiques de récupération de DEEE des pays ou régions d'Europe qui ont le taux de collecte par habitant le plus élevé. Les

données analysées sont celles du Danemark, de la Suède, de la Suisse, de l'Allemagne et de la Belgique avec la Région flamande qui a, au travers de ses propres décrets, des objectifs ambitieux de gestion des déchets. Leur étude permet de proposer une série de recommandations pour l'ensemble des états de l'Union. Les axes privilégiés sont de renforcer le partenariat entre les institutions dirigeantes et les acteurs du traitement des déchets de type DEEE, ainsi que de renforcer la communication auprès de la population. Ces mesures comportent les éléments suivants:

- prolonger les heures d'ouverture des points de collecte;
- informer davantage le public sur l'emplacement des points de collecte;
- motiver la population à utiliser les parcs de recyclage comme canal de dépôt;
- augmenter le nombre de centres de recyclage;
- développer des méthodes de collecte qui favorisent la distinction du type de déchets.

Les auteurs préconisent également la publication du détail des taux de collecte pour renforcer la motivation et augmenter la concurrence des acteurs impliqués dans la gestion des déchets.

Enfin, ils recommandent un soutien systématique des autorités pour toutes les activités de réutilisation des DEEE pour réduire la quantité de déchets de ce type.

Synthèse des articles

Les articles de Gonda et al., et Friege et al., montrent combien l'efficacité de la collecte est directement liée aux investissements et aux ambitions des instances dirigeantes des états ou des régions, en matière de communication, de mise en place d'infrastructures de collectes et de contrôles des flux des DEEE. Ils ont en commun la nécessité de persuader les citoyens et les dirigeants d'entreprises qu'ils jouent un rôle actif dans le processus de recyclage des DEEE. Ils mettent également l'accent sur la nécessité de renforcer les réglementations envers les acteurs du traitement des DEEE et de renforcer les relations entre les instances dirigeantes et ces acteurs. Gonda et al. insistent sur la nécessité d'augmenter le nombre d'entreprises qui suivent des canaux de recyclage conformes pour réduire la quantité de DEEE qui suivent un parcours pas ou trop peu documenté. Friege et al. préconisent pour cela de publier le détail des taux de collecte pour renforcer la motivation des acteurs impliqués à augmenter leurs taux et réduire les coûts de la collecte.

3 Cycle de vie des équipements électriques et électroniques

Les DEEE sont l'émanation du dernier maillon du parcours de vie des équipements électriques et électroniques (EEE). Cette chaîne de vie, appelée cycle de vie, est constituée de plusieurs étapes par lesquelles va passer l'EEE, de l'extraction des composants servant à sa fabrication jusqu'à sa mise au rebut en fin de vie. Les stratégies mises en place pour gérer les DEEE ne peuvent pas ignorer l'impact sur l'environnement des différentes phases d'activité du produit qui constituent le cycle de vie.

Dans un premier point, ce chapitre fournit une description du cycle de vie des EEE. Le deuxième point est consacré à l'analyse de l'impact environnemental de chacune des étapes du cycle de vie des EEE. Le troisième point présente l'outil standard d'analyse du cycle de vie. Enfin, le dernier point expose le concept d'éco-conception pour améliorer les qualités écologiques des EEE.

3.1 Description du cycle de vie des EEE

Le cycle de vie d'un EEE correspond aux différentes étapes que traverse ce produit durant son existence. Toutefois, ces étapes dépendent du contexte dans lequel on définit le cycle de vie. Ainsi, au niveau marketing, le cycle de vie ne prend en considération que l'aspect économique du produit. Il correspond au temps durant lequel le produit offre une certaine rentabilité. Il commence à la conception du produit jusqu'à son déclin, lorsque ce dernier est sujet à une diminution significative des ventes ou une stagnation à un très bas niveau [22].

D'un point de vue environnemental, l'étendue des phases de vie du produit est plus large. Le cycle de vie prend en considération toutes les étapes de l'existence du produit pour lesquelles il peut avoir un impact sur l'environnement, depuis l'acquisition ou la production de matières premières à partir des ressources naturelles, jusqu'à la valorisation ou l'élimination définitive. C'est uniquement avec cette conception du cycle de vie que le produit en fin de vie est considéré comme un déchet pour lequel les actions mises en place vont déterminer la portée de leurs impacts sur l'environnement. Comme illustré à la Figure 3, la décomposition du cycle de vie comprend 5 étapes qui

peuvent former une boucle si, en fin de vie, le produit est intégré dans un programme de recyclage en vue d'une réutilisation ou d'une valorisation de ses composants [23].

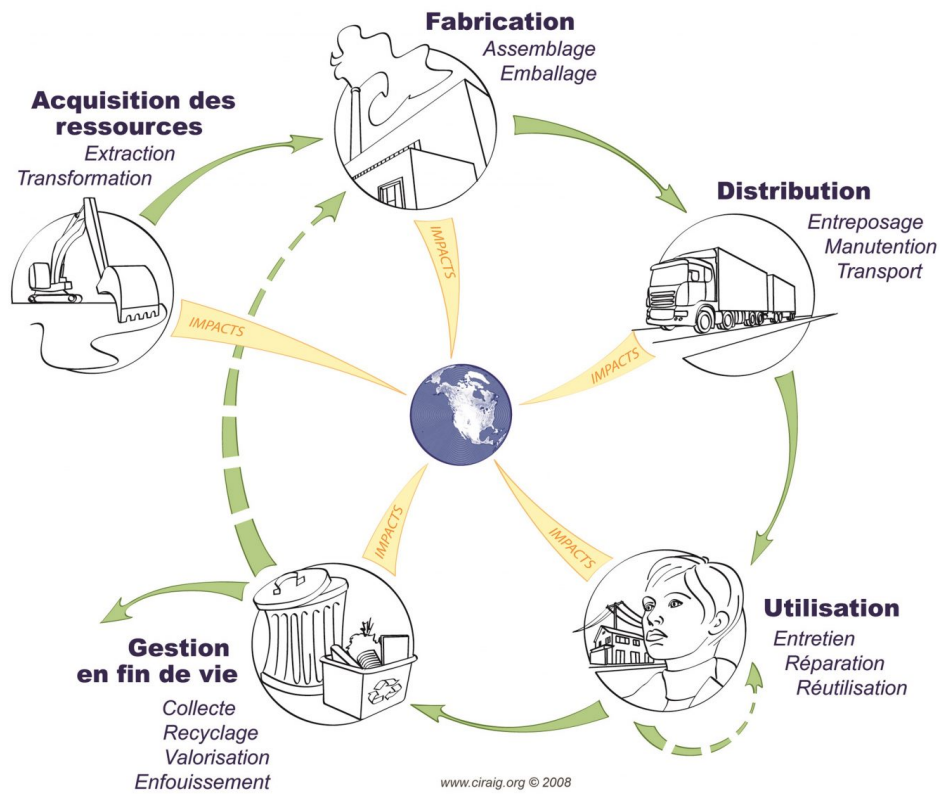


Figure 3 : Étapes du cycle de vie¹

Ce mode de fonctionnement est un procédé appelé économie circulaire. Elle s'oppose à l'économie linéaire qui a comme principe de transformer les matières premières en produits qui, en fin de vie, perdront de leur valeur. Ils finiront comme déchets et seront détruits. Dans l'économie circulaire, le principe consiste à réutiliser au maximum les matériaux et matières premières récoltés en fin de vie pour les réinjecter dans la boucle du cycle de vie.

Comme indiqué sur le portail du gouvernement Belge dans sa section développement durable [24], l'économie circulaire cherche à favoriser:

- l'entretien, la réparation et la réutilisation des produits
- une conception adaptée des produits en vue de leur réparation et la réutilisation totale ou partielle de leurs composants en fin de vie

¹ www.ciraig.com @ 2008

- la fabrication de nouveaux produits à partir de pièces, de composants ou de produits déclassés
- le recyclage de matériaux et déchets industriels, agricoles ou ménagers
- l'utilisation efficace des ressources lors des phases de production et de consommation.

3.2 Impact environnemental des étapes du cycle de vie des EEE

3.2.1 Extraction et transformation de matières premières

La composition des EEE est très variée mais les composants qui prédominent sont les métaux, principalement le fer, le cuivre et l'aluminium, et dans une moindre mesure les métaux précieux comme l'argent, l'or et le palladium. On trouve également mais en très faible quantité des terres rares [25]. Ces métaux sont appelés terres rares, non pas parce qu'on les trouve en faible quantité sur terre mais parce qu'ils ont une grande valeur stratégique car en plus du domaine des EEE, ils sont abondamment utilisés dans de nombreux secteurs de l'industrie comme par exemple l'aéronautique ou l'automobile [26].

La principale source d'approvisionnement de l'ensemble de ces métaux est l'exploitation minière. Malgré une amélioration des opérations d'extraction ces dernières années, les risques pour l'environnement sont toujours nombreux.

Le principal danger, c'est la contamination de l'eau contenue dans les sols, les rivières, les lacs et les nappes phréatiques avoisinantes. Plusieurs cas de figure peuvent être source de pollution [27]:

- Dans les mines à ciel ouvert, l'eau de pluie mélangée aux roches extraites contenant du sulfure se transforme au contact de l'air en acide sulfurique extrêmement toxique pour l'environnement.
- Dans les mines souterraines, le ruissellement des eaux souterraines emporte des métaux potentiellement dangereux pour l'environnement par un processus de filtration et lessivage des roches (arsenic, cobalt, cuivre, cadmium, plomb, argent, zinc).
- Après l'extraction, une grande quantité d'eau associée à des produits chimiques est utilisée pour le traitement qui consiste à séparer les minerais de la roche.

Dans tous les cas, ces eaux doivent être correctement récupérées et traitées. Dans le cas contraire, elles sont susceptibles d'engendrer de graves dommages pour l'environnement.

Une autre forme de pollution porte sur la destruction de zones naturelles. Dans les mines à ciel ouvert, des trous béants sont creusés dans le sol et dans certains cas, des quantités considérables de roches inexploitées et de sédiments sont extraits et amassés dans des terrils aux abords du site. Au terme de l'exploitation, ces zones sont stériles de toute biodiversité. La recolonisation par les plantes de ces espaces pollués peut prendre des centaines d'années. La disparition de la flore des sites miniers en fin d'exploitation rompt la chaîne alimentaire et rend difficile l'habitat pour la faune locale [28].

Enfin, de nombreux sites d'exploitation minière sont implantés dans des zones forestières. Cette activité est estimée à 7 % de la déforestation mondiale. Ce déboisement auquel on peut ajouter la production de CO₂ émis par les machines et la transformation du minerai en métal, contribuent largement à l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère ainsi qu'à l'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique [29].

3.2.2 Fabrication

La demande incessante d'appareils numériques entraîne une augmentation croissante de la production et provoque un épuisement des ressources naturelles. Par exemple, pour la fabrication d'un ordinateur de 2 kg, il a fallu l'équivalent de son poids en produits chimiques, 10 fois son poids en matières premières et aux environs de 1500 litres d'eau. Cette production engendre une quantité moyenne de CO₂ estimée à 124 Kg [30][31]. Autre exemple, pour la fabrication d'un microcircuit en silicium de 2 grammes, il faut 1,6 kg de matières fossiles, 30 litres d'eau et 72 grammes de produits chimiques, certains dangereux tels les Polychlorobiphényles (PCB). Les PCB sont utilisés comme isolants électriques, ils font partie de la catégorie des perturbateurs endocriniens [32].

La fabrication d'équipements électroniques nécessite la manipulation de nombreux composants dont la toxicité est élevée. Par exemple, le cadmium est utilisé comme

revêtement de protection pour les métaux ferreux. En cas d'ingestion par l'homme, il peut provoquer des gastro-entérites et pourrait être cancérigène [30].

Dans les ordinateurs et les téléphones portables, on trouve des matériaux comme le plomb, le mercure, l'arsenic et toute une série d'autres composants (voir Figure 4 et Figure 5), qui représentent un danger pour les personnes qui doivent assembler les différentes parties de l'appareil.

Dans de nombreux EEE et particulièrement dans les écrans, on trouve généralement des retardateurs de flamme. Ces composés chimiques permettent de réduire le risque d'incendie mais de nombreux retardateurs de flamme sont suspectés d'avoir des effets nocifs pour la santé et l'environnement. On leur connaît des effets délétères au niveau des fonctions hépatiques, thyroïdiennes et œstrogéniques [30].

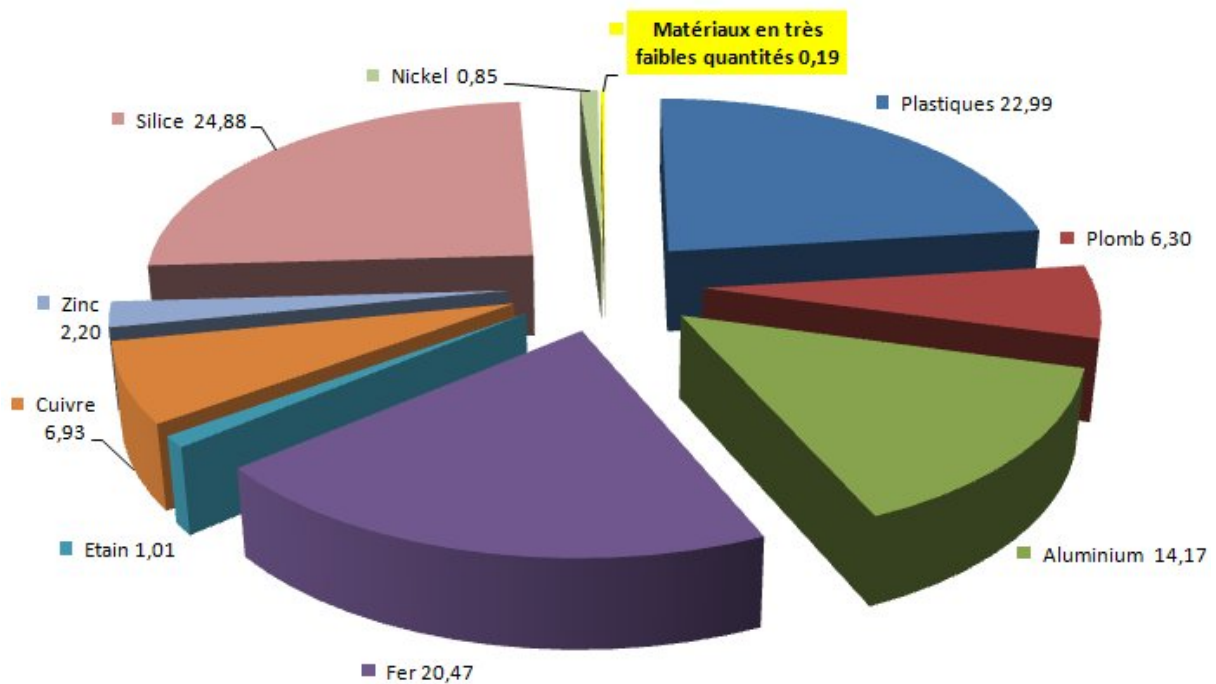


Figure 4 : Contenu d'un PC (% du poids total) [25]

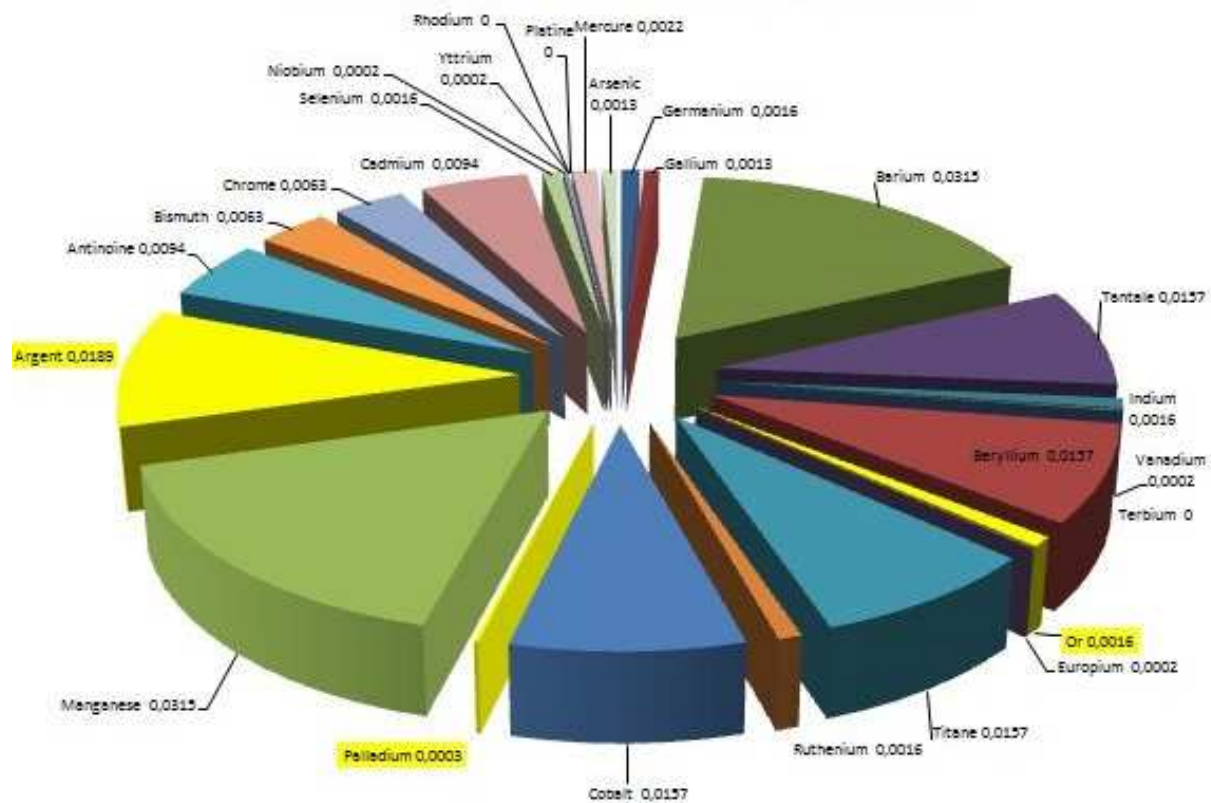


Figure 5 : Matériaux en très faible quantité (% du poids total) [25]

3.2.3 Distribution

Bien que du point de vue du cycle de vie, le transport soit inclus dans la catégorie Distribution, il est à prendre en compte dans chaque étape du cycle de vie des équipements. Les ressources naturelles qui sont nécessaires à la fabrication sont acheminées vers les unités de production. Les produits finis sont livrés aux grossistes et sont ensuite répartis entre les différents détaillants. Une fois le produit en fin de vie déposé dans un point de collecte, il est acheminé vers les unités de recyclage qui, en fonction de l'état du matériel, renverra le produit chez un détaillant qui le mettra en vente comme matériel d'occasion, ou les composants du produit fragmenté seront transportés pour être transformés, conduits en décharge, vers un incinérateur...

Les différentes parties d'un appareil électronique proviennent souvent du monde entier et les consommateurs à qui est destiné ce matériel résident dans toutes les parties habitées du globe. Cela signifie qu'un appareil peut faire plusieurs fois le tour de la terre durant son existence. Par exemple, un téléphone portable fait quatre fois le tour du monde, depuis l'approvisionnement en matériaux jusqu'au moment où le

consommateur l'achète [33]. Pour répondre à cette réalité, les moyens de transport de ces marchandises parcourent de grandes distances pour acheminer ces équipements, ce qui entraîne de nombreux transports routiers, maritimes, fluviaux et aériens.

La première source de pollution du transport est atmosphérique. Les moteurs thermiques des camions, bateaux et avions, alimentés en fuel, émettent dans l'air du dioxyde de carbone (CO₂), du méthane et des hydrocarbures [34]. Ces gaz accumulés en altitude ont un effet réfléchissant pour les rayons du soleil et sont responsables de l'augmentation de la température de l'atmosphère par effet de serre [35]. Le rejet et l'accumulation de particules fines des moteurs proches des zones habitées ont un impact direct sur la santé des résidents si les concentrations sont trop élevées [36].

A cela s'ajoutent les transports maritimes et fluviaux qui sont responsables de la pollution de l'eau des fleuves, mers et océans. La principale source de pollution est liée au phénomène de vidange des ballasts au terme d'un voyage à vide. Pour s'assurer de la stabilité et abaisser la ligne de flottaison d'un bateau quand il n'a pas de fret, les calles sont remplies d'eau qui se mélange aux résidus d'hydrocarbures ou autres déchets présents. Avant d'arriver à destination, le contenu des ballasts est évacué et représente, par conséquent, une source de pollution de l'eau [37].

En termes d'entreposage et de manutention, l'impact environnemental est assez faible. Les EEE ne demandent pas de précautions particulières de conservation. Il n'est pas nécessaire d'avoir des salles réfrigérées et gourmandes en énergie, comme c'est le cas pour des denrées alimentaires. La durée d'entreposage est assez faible comparativement à certains produits, comme par exemple, des déchets radioactifs dont le confinement en milieu fermé de certains éléments peut atteindre plusieurs centaines de milliers d'années [38]. Les EEE sont des équipements légers en comparaison à d'autres produits industriels. Leur manipulation ne nécessite pas d'engins lourds et fortement polluants.

3.2.4 Utilisation

La période d'utilisation des équipements électroniques est également responsable de l'impact sur l'environnement de manière significative. En 2018, la consommation mondiale énergétique des outils numériques représentait 2,7 % de la consommation totale d'énergie dans le monde. On estime qu'elle doit avoir atteint 3,3 % en 2020.

Cette tendance à la hausse participe à l'augmentation de la quantité mondiale des émissions de gaz à effet de serre. Estimée par l'Insee¹ à 3,7 % en 2017 [39], elle est sans cesse en augmentation et est évaluée par l'ADEME² à 4 % en 2019. Avec dans le monde, 15 milliards d'objets connectés, 800 millions d'équipements réseaux et 45 millions de serveurs, 47 % de ces émissions de gaz à effet de serre sont dus aux équipements des consommateurs, 28 % aux infrastructures réseau et 25 % aux data centers [31].

Cette consommation croissante d'énergie est liée à un grand besoin en électricité. En introduction de son rapport sur les besoins énergétiques d'Internet, Greenpeace estimait qu'en 2016, le secteur IT avait consommé approximativement 7 % de l'électricité mondiale [40] mais un rapport de l'association The Shift Project a calculé que la consommation en électricité du numérique s'élèverait à 14 % en 2017 et les prévisions pour 2020 avoisinent les 16 % de la consommation mondiale d'électricité [41].

3.2.5 Gestion de fin de vie

En fin de vie, les équipements électriques et électroniques deviennent des déchets d'équipements électriques et électroniques. Plusieurs alternatives sont alors possibles [42]:

- L'appareil est encore en état de marche et peut être directement réintégré sur le marché du matériel d'occasion. De cette façon, il réintègre le cycle de vie et prolonge son existence.
- L'appareil est endommagé mais réparable. Il est remis en état et est revendu comme matériel d'occasion.
- L'appareil est définitivement endommagé ou trop vétuste, il est alors orienté vers une unité de recyclage des composants où il sera désassemblé. Les composants et les matériaux qui peuvent être valorisés seront réintégrés dans des unités de fabrication. Le reste, considéré comme rebut, sera conduit en décharge ou incinéré.

¹ Institut national de la statistique et des études économiques, France

² Agence de la transition écologique, France

Cette gestion représente un enjeu fondamental pour l'environnement. L'impact environnemental est directement lié à la quantité de déchets produits. L'augmentation de la quantité et de la qualité des procédés permettant d'éviter la mise au rebut d'un appareil ou d'une partie de cet appareil va directement avoir une influence sur la pollution engendrée par cette ultime étape du cycle de vie.

3.3 L'outil d'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est l'outil normalisé permettant, comme l'indiquent Bol et al. dans leur article de 2013 [14], de déterminer les impacts environnementaux potentiels et les ressources utilisées d'un produit tout au long de son cycle de vie. Les bases méthodologiques de l'ACV sont décrites par les normes ISO 14040 à 14044 [23][43]. Ces normes font partie de la catégorie « ISO 14000 Management environnemental » qui a pour objectif de procurer des outils permettant aux entreprises d'intégrer la prise en considération de l'environnement dans leur stratégie de gestion [44].

Le processus d'analyse du cycle de vie comprend 4 étapes [45][46][47]:

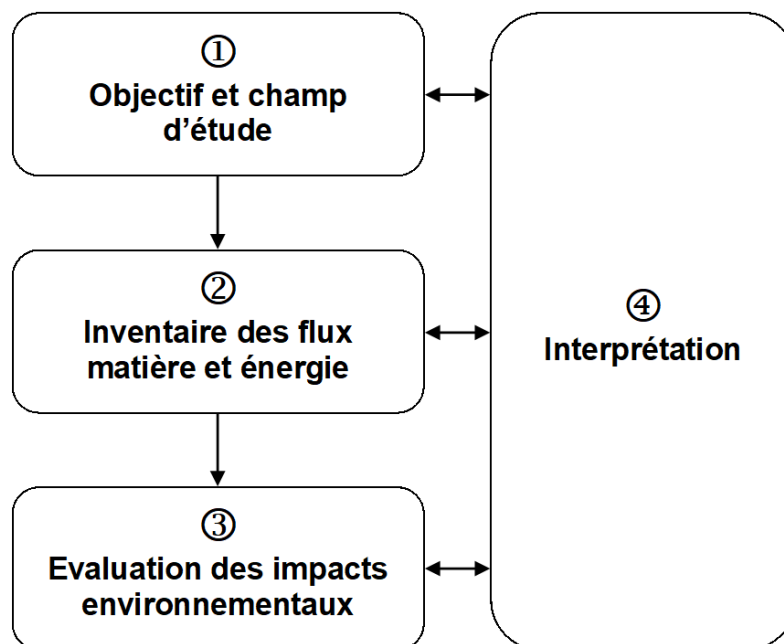


Figure 6 : Étapes d'analyse du cycle de vie [45][46]

1. Définition des objectifs et du périmètre d'étude

Cette étape consiste à déterminer quel est l'objectif de l'étude entre:

- une comparaison de produits pour déterminer le degré d'impact environnemental de chacun,
- une analyse de méthodes de fabrication avec un objectif d'éco-conception pour réduire l'impact environnemental des produits,
- une déclaration environnementale qui fournit des données relatives à l'impact environnemental des produits.

Il faut également déterminer le périmètre de l'analyse, une description du cycle de vie, les limites de l'étude, la nature des destinataires, l'unité fonctionnelle et la qualité des données collectées (fabricant, administration, association de consommateurs...).

2. L'inventaire du cycle de vie

Cette étape, appelée également "Inventaire des flux", consiste à déterminer quels sont les flux entrants et sortants de matières et d'énergies pour chacune des phases du cycle de vie. Comme flux entrant, on trouve l'utilisation de matières premières, la consommation d'énergie... Et comme flux sortant, on peut avoir l'émission de pollutions, la production de matières recyclées et de déchets...

3. L'évaluation des impacts

A cette étape, on détermine les impacts environnementaux de chacun des flux répertoriés précédemment. Il est alors possible de calculer l'empreinte écologique du total de la quantité d'énergie consommée et de la quantité de déchets produits pour l'ensemble des flux inventoriés.

4. L'interprétation des résultats

Dans cette dernière étape, on confronte les résultats obtenus avec les objectifs initiaux. Il est alors possible d'affiner les résultats en passant en revue les précédentes étapes selon un mécanisme d'itération. Les étapes sont alors améliorées jusqu'à l'obtention d'une satisfaction complète.

Elle permet également de mettre en évidence des pratiques ou des composants du produit dont l'impact environnemental est davantage critique et qui pourraient être respectivement adaptés ou remplacés.

Enfin, on tire les conclusions de l'ensemble des informations récoltées et on établit le bilan de l'ACV. Il permet d'établir une liste de recommandations pour l'optimisation en termes d'impacts environnementaux, de la conception et de l'utilisation du produit.

3.4 L'éco-conception

L'éco-conception a pour objectif de prendre en considération les critères environnementaux de chacune des étapes du cycle de vie lors de la phase de conception d'un produit (bien matériel ou service) [48]. C'est par exemple sur cette base que Bol et al. ont réalisé une étude sur l'élaboration de circuits électroniques intégrés en proposant des méthodes de fabrication et des composants moins nocifs pour l'environnement [14]. Cette étape, qui précède la fabrication, vise à prévoir la réduction de l'impact environnemental de toutes les phases du cycle de vie du produit. L'objectif est de concevoir un produit qui va minimiser la consommation en matières premières et en énergie, un produit qui aura un impact écologique réduit au niveau des rejets dans l'air et dans l'eau, de la production des déchets, du bruit...

Il n'est pas rare que des entreprises utilisent l'analyse du cycle de vie pour déterminer les solutions de fabrication les moins impactantes en termes d'environnement.

Les critères pris en compte sont [49]:

- Consommation de matières premières
- Consommation d'énergie
- Rejets en milieu naturel et autres pollutions
- Incidences climatiques
- Incidences sur la biodiversité

Par leur directive 2009/125/CE publiée en 2009 [50], le Parlement européen et le Conseil décrivent un cadre légal d'exigences à respecter qui peuvent être appliquées aux produits du type EEE à des fins d'éco-conception. Ensuite, par leur directive

2012/19/UE publiée en 2012 [18], le parlement Européen et le Conseil encouragent les états membres à prendre les mesures appropriées pour répondre aux aspirations en matière d'éco-conception.

En plus de l'amélioration des qualités écologiques des produits, les industries peuvent, via l'éco-conception, réduire leurs dépenses en diminuant les coûts liés aux transports et à l'usage de matières premières, ou grâce à l'augmentation des matériaux issus du recyclage... [51][52]

Elles peuvent également faire la demande pour obtenir la certification ISO/TR 14062:2002: « Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit » [53].

4 Analyse de l'état de la pratique en Belgique

A la lecture de l'état de l'art développé au point 2 et sur base de la description de chacune des étapes du cycle de vie développées au point 3, on peut se poser la question de savoir quelles sont les mesures mises en place en Belgique pour réduire l'impact environnemental des DEEE et, plus particulièrement, les mesures mises en place à chacune des étapes du cycle de vie des équipements électroniques.

Dans ce chapitre, chaque étape du cycle de vie est analysée à l'échelle de la Belgique. A chaque étape, un inventaire des éléments déjà mis en place est suivi de propositions d'améliorations.

4.1 Extraction de matières premières

État des lieux

De nos jours, les sites d'extraction minière toujours actifs en Belgique ont pour objectif de fournir aux entreprises des minéraux industriels comme les calcaires et les dolomies. On trouve aussi des mines d'extraction de produits utilisés en construction comme les sables, les graviers, les concassés, qui entrent dans la fabrication du béton. Enfin, le sol belge permet encore de récolter certaines pierres ornementales comme le petit granit [54].

Par contre, l'extraction de minerais métalliques, utiles à la fabrication de composants électroniques, n'existe plus en Belgique depuis plusieurs décennies, comme le montre la Figure 7. Elle s'est achevée avec le minerai de fer en 1975 [55]. L'arrêt de ces exploitations est la conséquence d'une large concurrence internationale pour l'extraction des matières premières. Et à l'époque, les gisements étaient considérés comme épuisés vu que les techniques d'extraction ne permettaient pas de recueillir davantage de minerais. De ce fait, la perte de rentabilité n'a plus rendu possible la poursuite des activités d'extraction [56].

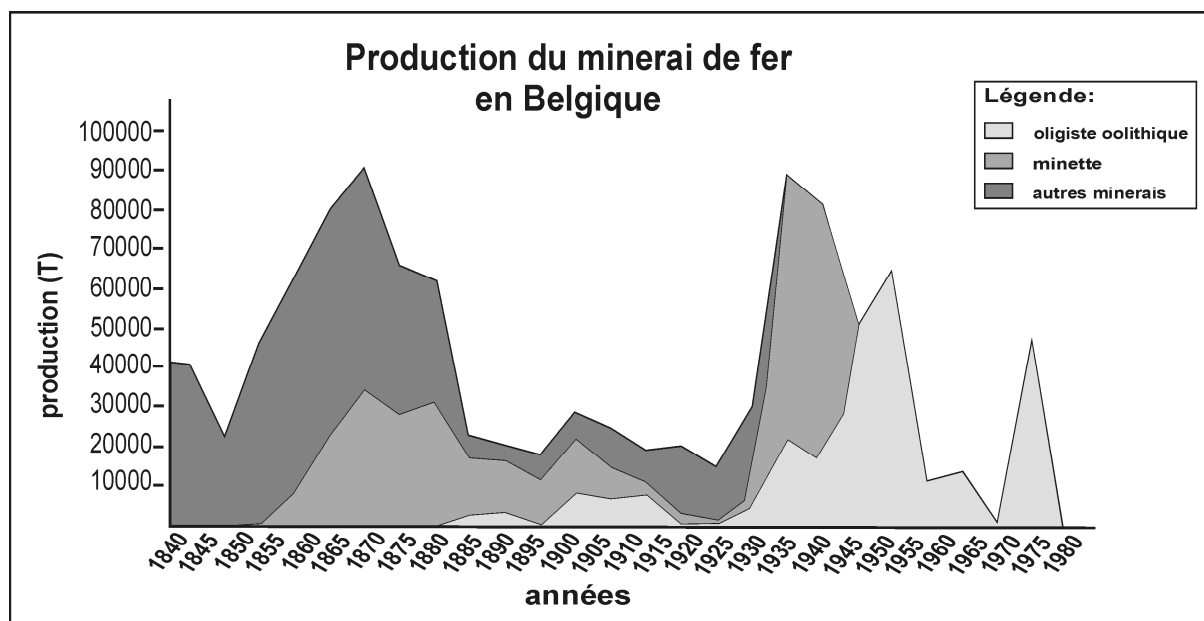


Figure 7 : Production du minerai de fer en Belgique de 1840 à 1975 [55]

Dès lors, la Belgique, comme de nombreux pays européens, est aujourd'hui fortement dépendante des pays exportateurs pour l'approvisionnement de ces matières premières, principalement la Chine, les États-Unis et la Russie [26]. Cette dépendance, d'une part, fragilise l'économie nationale et d'autre part, ne permet pas de contrôler les méthodes de travail dans les mines d'extraction. Aucune vérification n'est possible sur le respect de l'environnement en matière de pollution et sur le bien-être des travailleurs du secteur, les deux étant sous la responsabilité des gestionnaires locaux. Cependant, comme les besoins énergétiques sont en croissance permanente, les matières premières continuent à jouer un rôle majeur dans l'économie des états européens, en particulier les terres rares qui composent les éléments électriques et électroniques, et qui représentent une part importante de l'économie. Elles font partie de la liste regroupant des matières premières classées comme critiques par l'Union Européenne. Depuis 2017, cette liste reprend 27 matières premières exposées à un plus grand risque de pénurie d'approvisionnement [57]:

Tableau 8 : Liste des matériaux critiques pour l'Union européenne

1. Antimoine*	15. Indium*
2. Barytine	16. Magnésium
3. Béryllium*	17. Niobium*
4. Bismuth*	18. Platinoïdes*
5. Borate	19. Phosphorite

6. Cobalt*	20. Phosphore
7. Charbon à coke	21. Scandium
8. Fluorine	22. Silicium*
9. Gallium*	23. Tantale*
10. Gomme naturelle	24. Terres rares légères*
11. Germanium*	25. Terres rares lourdes*
12. Graphite	26. Tungstène
13. Hafnium	27. Vanadium*
14. Hélium	

* Éléments présents dans les ordinateurs

Piste d'amélioration

Comme les procédés d'extraction étaient particulièrement peu respectueux de l'environnement, la Belgique, comme de nombreux pays, a stoppé sa production dans les années 80. Mais aujourd'hui, soutenus par l'Union européenne (UE) qui voudrait réduire sa dépendance aux autres régions du monde, de nombreux projets d'intensification des extractions de matières premières sont envisagés pour ajouter aux 15 pays producteurs de la Figure 8, la quasi totalité des états de l'Union comme illustré à la Figure 9 [57][58].

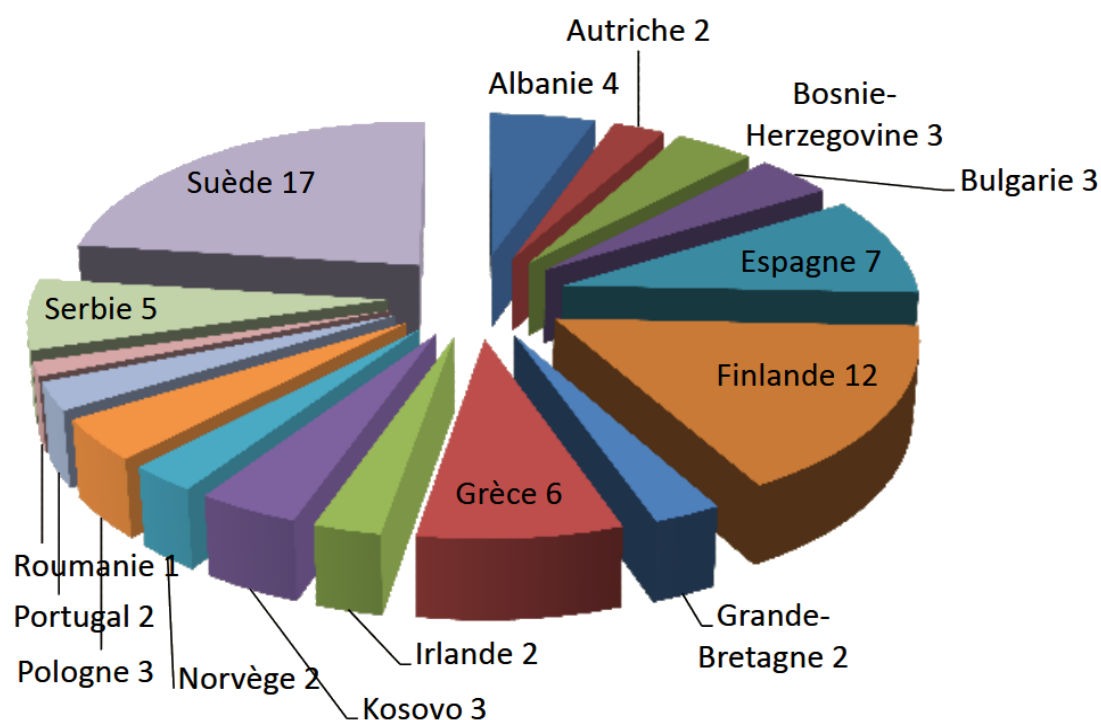


Figure 8 : Répartition par pays du nombre de mines métalliques en Europe en 2016 [58]

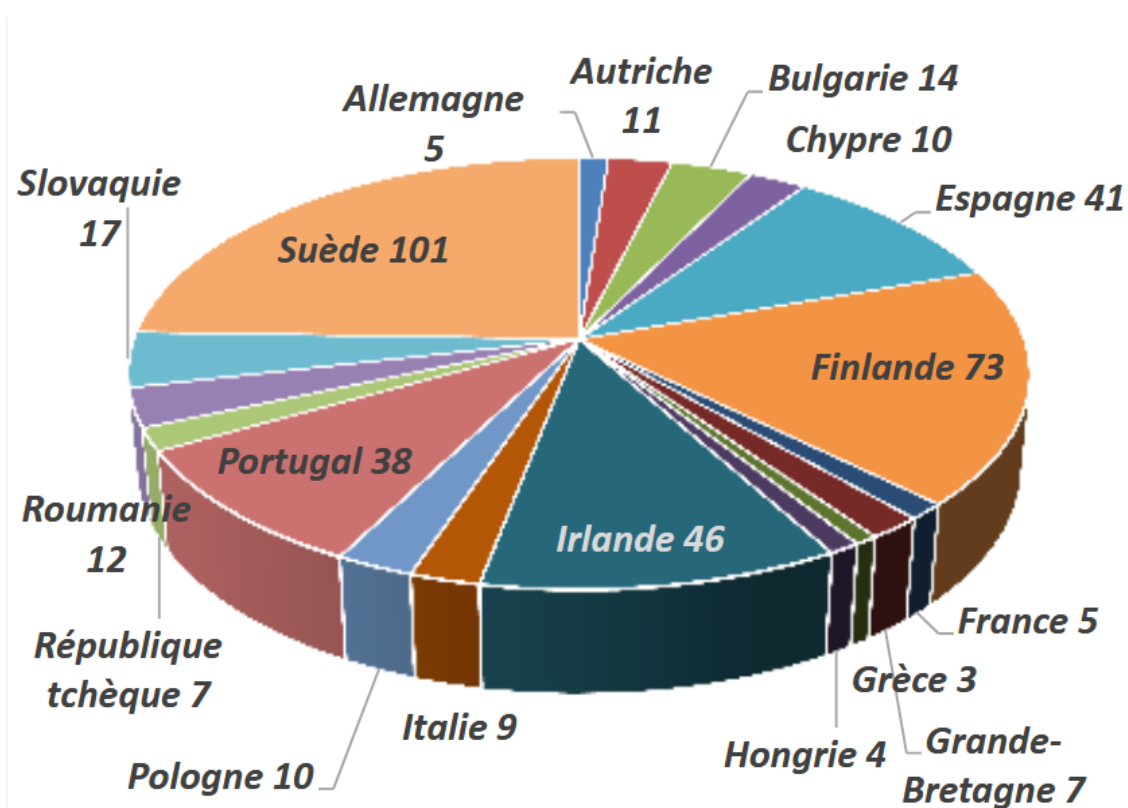


Figure 9 : Répartition par pays du nombre de projets miniers métalliques en Europe en 2016 [58]

Cependant, pour minimiser au maximum les conséquences de l'impact sur l'environnement lié à ce type d'exploitation, l'UE a publié un document d'orientation sur la mise en œuvre des activités extractives non énergétiques conformément aux critères Natura 2000 [59]. Le réseau Natura 2000 regroupe 26 000 sites répartis dans les 27 pays de l'UE. Ces sites sont protégés pour permettre le développement à long terme des espèces, des habitats et des écosystèmes les plus précieux et les plus menacés en Europe.

L'UE définit les principaux objectifs assignés aux sites Natura 2000 comme étant [60]:

- « éviter les activités pouvant gravement perturber les espèces ou porter atteinte aux habitats pour lesquels le site a été classé »
- « prendre des mesures, le cas échéant, afin de maintenir et de rétablir ces habitats et espèces et d'améliorer leur préservation »

Pour l'industrie extractive, cela signifie qu'il faut:

- évaluer les effets potentiels des activités sur l'environnement;
- envisager des solutions alternatives si un projet ne peut certifier qu'il n'y aura aucune incidence néfaste sur l'intégrité du site concerné;
- planifier la stratégie environnementale pour garantir la rentabilité économique et minimiser les impacts négatifs sur l'environnement;
- établir la procédure à suivre dans le respect de la directive habitat de Natura 2000 portant sur la protection de la biodiversité et la conservation des habitats naturels;
- prévoir une remise en état du site après exploitation consistant à recouvrer un terrain utilisable sur les anciennes friches industrielles.

Bien que la Belgique ne figure pas dans la liste des projets miniers pour l'Europe, selon le géologue Eric Pirard, « Il reste des ressources exploitables dans le sous-sol belge ». Plusieurs études ont été menées pour juger de la rentabilité du sous-sol belge et estimer l'étendue de ses richesses [56]. Les nouvelles technologies, en particulier les innovations dans le domaine de la robotique, permettent une extraction de métaux rares devenue rentable, et ce, tout en respectant l'environnement [61]. Contrairement à de nombreux pays exploitants dépourvus de scrupule écologique, la Belgique pourrait, en imposant des règles strictes, s'assurer de rendre le processus moins impactant pour l'environnement et imposer des conditions de travail décentes aux acteurs du secteur. Toutefois, l'activité minière engendre indubitablement des nuisances environnementales qu'il va falloir prendre en considération et s'assurer d'avoir toutes les garanties en ce

qui concerne la propreté, la durabilité et la responsabilité des acteurs du secteur. Cela signifie qu'il sera essentiel de veiller à réduire la quantité de poussières toxiques et de roches stériles générées par l'exploitation. Il faudra également s'assurer que l'usage des produits chimiques nécessaires au traitement des minerais soit parfaitement contrôlé. Enfin, des procédures strictes devront être mises en place pour éviter toute contamination des eaux avoisinantes pouvant provoquer une pollution dommageable à la faune et la flore locales [62][27].

Il est également essentiel que l'activité se fasse de manière totalement transparente pour que les contrôles soient possibles et pour rassurer la population proche des sites d'extraction.

Il est nécessaire de fournir une information claire auprès des résidents locaux si l'on veut obtenir leur adhésion et qu'ils ne s'opposent pas systématiquement à une reprise de production d'anciens sites miniers [63].

En conclusion, cela impose de travailler de manière responsable en faisant usage des dernières avancées technologiques.

4.2 Fabrication

État des lieux

En Belgique, la fabrication d'équipements électroniques n'est pas un secteur dominant. Dans son rapport pour l'année 2018, l'ONSS répertorie 204 sociétés dédiées à la fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques [64]. Parmi celles-ci, 100 sont des fabricants d'ordinateurs et d'équipements périphériques [65]. Cela représente seulement 2,9 % de l'ensemble de l'industrie manufacturière belge [66]. Comme on peut le voir sur la Figure 10, c'est significativement moins important que les principaux secteurs de fabrication qui sont:

- l'industrie chimique (16,2 % de la valeur ajoutée manufacturière totale);
- les industries alimentaires et les boissons (14,7 %);
- l'industrie pharmaceutique (13,8 %);
- la fabrication de métaux de base et fabrications en métal (12,9 %).

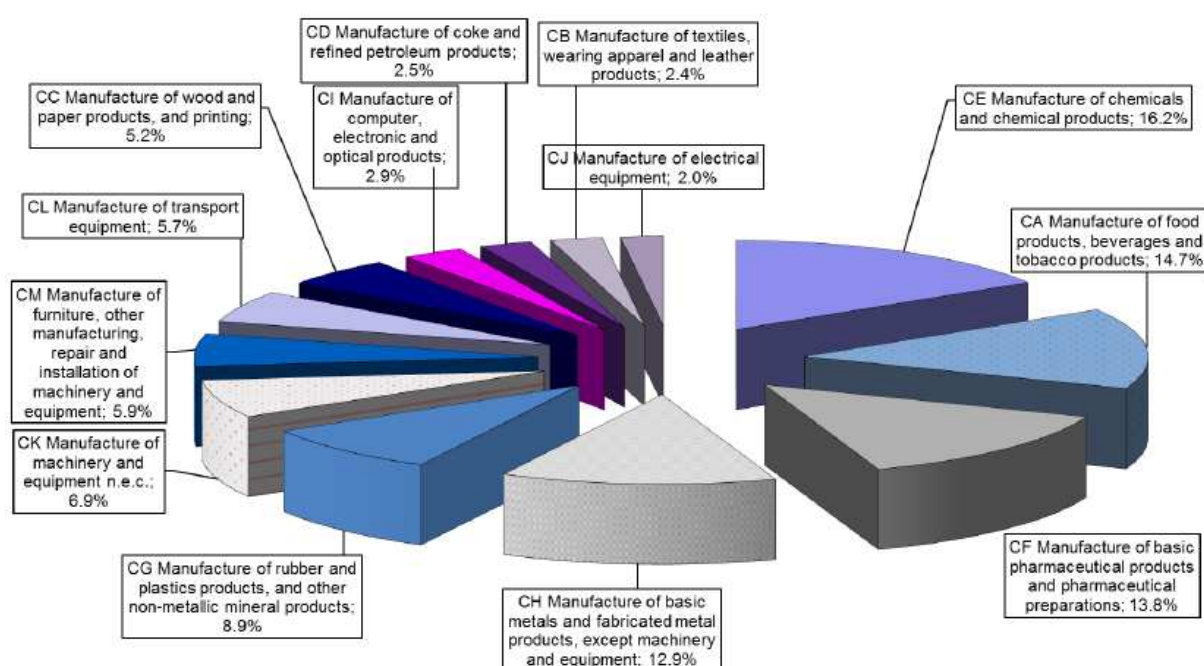


Figure 10 : Répartition des secteurs de l'industrie manufacturière belge en 2018 [66]

A l'échelle des 40 300 sociétés répertoriées par le Service Public Fédéral Economie et qui sont actives dans les TIC, l'industrie manufacturière ne représente que 1,1 % de l'ensemble des entreprises du secteur [67].

Les exportations d'équipements électriques et électroniques pour la Belgique se sont élevées à 13,8 milliards d'euros en 2019 sur un montant total d'exportation de 395,6 milliards d'euros, soit l'équivalent de 3,5 % [68][69]. Si l'on applique à ces 3,5 % d'exportation une répartition au prorata de la fabrication des équipements qui est de 2,9 % pour l'électronique et 2,0 % pour les équipements électriques, l'électronique seule ne représenterait qu'un peu plus de 2 % du montant total des produits exportés par la Belgique.

Pistes d'amélioration

Si on fait abstraction des besoins en matières première vus au point 4.1, et comparativement à d'autres produits industriels, l'étape de fabrication des équipements électroniques nécessite une quantité relativement faible d'énergie [70]. D'autre part, comme indiqué dans le point précédent, la Belgique compte peu d'entreprises de fabrication d'équipements électroniques. En prenant en considération ces deux éléments, on peut déduire que l'incidence environnementale des activités de fabrication de composants électroniques est très faible pour l'état belge.

Toutefois, une promotion de l'éco-conception permettrait de réduire l'incidence environnementale de ces entreprises sans porter atteinte à leur productivité. Ceci peut passer par le renforcement des mesures déjà mises en place:

- On trouve par exemple les services d'accompagnement proposés par l'UCM qui réalisent une analyse du cycle de vie de l'activité des entreprises et offrent des pistes d'améliorations environnementales directement applicables [71].
- Au niveau fédéral, le ministère de la santé publique et le ministère de l'énergie et du développement durable proposent respectivement un article Internet et une brochure dans l'optique de promouvoir l'éco-conception [72][73].

4.3 Distribution

État des lieux

Comme indiqué au point 3.2.3, le transport représente le secteur le plus impactant en termes d'environnement pour le domaine de la distribution. C'est la raison pour laquelle il ne faut pas négliger que le matériel électronique, qui provient principalement de l'étranger, parcourt généralement de longues distances avant d'arriver en Belgique. Cependant, en ce qui concerne l'acheminement des produits finis à destination des utilisateurs, une fois sur le territoire belge, le réseau est dense mais les distances à parcourir sont courtes puisque le pays est petit comparativement à d'autres états. Cet aspect pourrait être considéré comme un atout au niveau écologique sauf que cela engendre une plus grande part de transport routier que fluvial ou ferroviaire. Et comme on peut le constater dans le Tableau 9, le transport routier est en moyenne responsable

de 2 à 4 fois plus d'émissions de CO₂ que le transport fluvial et 5,5 fois plus que le transport par chemin de fer [74][75].

Comme l'indique le Service public fédéral Mobilité et Transports dans sa brochure de 2016, plus de 3/4 des marchandises ont été acheminées par route en 2010 (Figure 11) [76].

Tableau 9 : Moyennes des taux d'émission de CO₂ pour déplacer 1 tonne de marchandise sur 1 kilomètre [74][75]

Train	14 g de CO ₂
Bateau de navigation intérieure	21 à 44 g de CO ₂
Camion	76 à 79 g de CO ₂

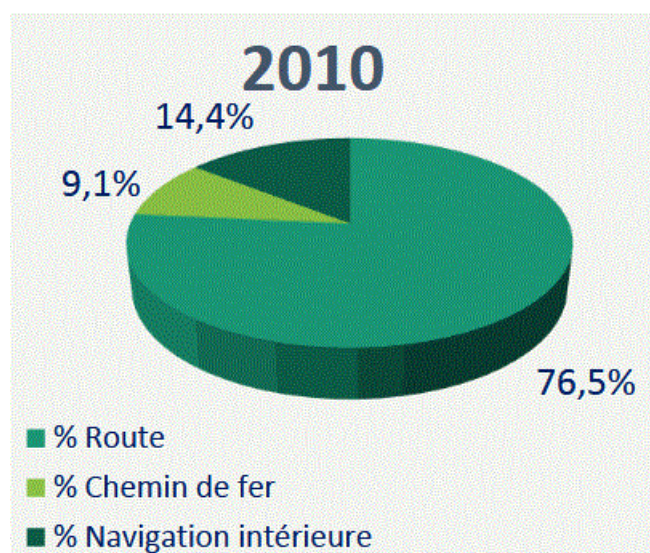


Figure 11 : Transport de marchandises en Belgique [76]

Pistes d'amélioration

Maxime Dumoulin indique dans son article d'information économique [77] que, comme l'indique Infrabel, c'est le nombre important des chantiers qui sont à l'origine d'une sous-exploitation du rail. Pour intensifier l'usage du train, il est nécessaire de réduire le nombre d'interventions obligeant le gestionnaire de réseau Infrabel à couper une et parfois deux voies de chemin de fer. Sans cela, le transport routier reste privilégié puisque, comme l'indique Eloïse de Villegas de la Fédération des entreprises de Belgique, « Le coût d'un passage d'un mode à l'autre reste très élevé à l'heure actuelle.

Cela montre qu'un camion propose une plus grande flexibilité un prix plus attractif que le train. » [77]

Il est également essentiel de renforcer l'idée auprès des entreprises que le transport fluvial est une opportunité qui permet de faire le choix d'une alternative durable en même temps que d'éviter des blocages liés à l'engorgement du réseau routier [78]. Les avantages de ce concept sont confirmés dans la pratique. Dans son interview du 25 janvier 2018 accordée à Thierry Vangulick de la RTBF, Catherine Mahieu, directrice du Port autonome du Centre et de l'Ouest à La Louvière, indique à ce propos que « Certaines entreprises se rapprochent physiquement des canaux ou s'y raccordent via les plates-formes multimodales. Et elles adaptent leur logistique en fonction de ce moyen de transport. Et puis elles se rendent compte que les équipements qui se développent aujourd'hui rendent le transport fluvial plus facile, plus sûr et moins coûteux » [78].

4.4 Utilisation

État des lieux

Dans son rapport annuel de 2018 [79], Recupel indique que les ménages belges possèdent au total 375 millions d'appareils électriques ou électroniques, ce qui correspond à 77 appareils en moyenne par ménage. Ce rapport précise que 10 d'entre eux ne sont plus utilisés. Ce qui équivaut approximativement à 50 millions d'appareils électriques ou électroniques inutilisés en Belgique et qui sont susceptibles d'être immédiatement récupérés pour entrer dans une filière de recyclage. Sur base du Tableau 10, on peut estimer que la partie électronique est approximativement de 40 % du total des éléments présents sur le marché constitués des écrans, des petits équipements électroniques et des appareils IT.

Tableau 10 : Poids par habitant d'EEE mis sur le marché belge en 2018

Source: adapté de Urban Mine Platform [80]

	kg/capita	
temperature exchange equipment	3,98	17,38%
screens	1,08	4,72%

lamps	0,09	0,39%
large equipment	9,01	39,34%
small equipment	6,51	28,43%
small it	2,23	9,74%
Total	22,9	100,00%

A la lecture du rapport digital 2020 publié par S. Kemp de l'association *We Are Social* [81], on peut déduire que la Belgique compte parmi les pays où l'usage des produits numériques est le plus répandu. On peut y voir qu'en Belgique, 10,81 millions de téléphones portables sont connectés et utilisés par 93 % de la population belge (Figure 12). C'est 26 % de plus que la moyenne mondiale. 90 % des Belges utilisent Internet alors que la moyenne dans le monde n'est que de 59 %. 8,75 millions de ces Belges connectés à Internet disposent d'un ordinateur et 5,41 millions utilisent aussi une tablette (Figure 13). Cela représente respectivement 84 % et 52 % des Belges connectés à Internet.

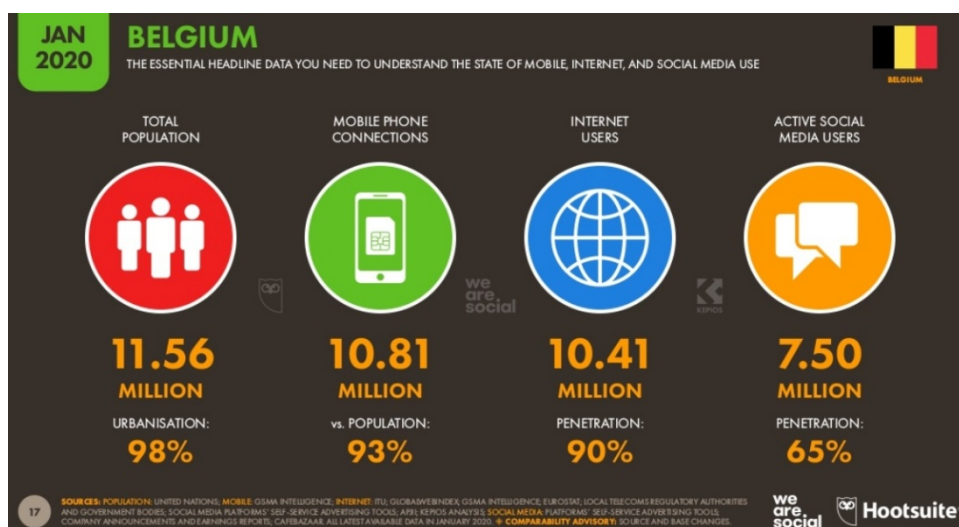


Figure 12 : Usage pour la Belgique des téléphones portables, Internet et des réseaux sociaux [81]



Figure 13 : Type d'appareil employé pour Internet par des utilisateurs âgés de 16 à 64 ans [81]

Pour répondre aux besoins d'hébergement de données des activités numériques des consommateurs, une trentaine de data centers sur les 4000 que l'on trouve dans le monde sont implantés en Belgique [82].

Pistes d'amélioration

Pour réduire l'impact environnemental de l'usage des produits numériques des consommateurs et des entreprises, les recommandations sont nombreuses [31][83][84][85]:

- Diminuer l'impact de l'utilisation des réseaux de communication
 - Regarder moins de vidéos en ligne
 - Stocker et utiliser le maximum de données localement, ne conserver que ce qui est utile, stocker uniquement le nécessaire sur le Cloud
 - Dans son navigateur, taper directement l'adresse d'un site, utiliser l'historique des consultations, créer des favoris pour toutes les adresses Internet utilisées régulièrement
 - Préférer dans l'ordre: le réseau ADSL, le Wifi, la 4G, et enfin le plus énergivore: la 5G
 - Désactiver les fonctions GPS, Wifi, Bluetooth sur les téléphones ou les tablettes quand ils ne servent pas.
- Réduire l'impact de la diffusion des messages électroniques
 - Cibler les destinataires, nettoyer les listes de diffusion et supprimer les pièces jointes en réponse à un message
 - Optimiser la taille des fichiers transmis, opter pour le format texte plutôt que l'HTML.
 - Utiliser des sites de dépôt temporaire plutôt que l'envoi en pièce jointe, surtout lorsqu'il y a plusieurs destinataires
 - Se désabonner des newsletters pour lesquelles on n'a plus d'intérêt
 - Faire régulièrement le tri dans ses messages et supprimer les plus anciens, les publicités, les SPAMS... , sans oublier de vider sa corbeille!
- Garder ses équipements numériques plus longtemps
 - Éviter de remplacer des équipements numériques sur un coup de tête, éviter des achats inutiles, garder le plus longtemps possible son matériel
 - Privilégier la réparation au remplacement en cas de panne

- Ne pas multiplier le matériel (smartphone, tablette, ordinateur fixe, portable...) mais privilégier un appareil suffisamment flexible que pour répondre à différents besoins
- Éteindre les appareils
 - Ne pas laisser les appareils ou les veilles allumés en permanence
 - Brancher les équipements sur une multiprise à interrupteur

Au niveau des organes officiels, certaines démarches ont déjà été mises en place, particulièrement en Régions wallonne et Bruxelles-Capitale, mais ces initiatives peuvent être intensifiées:

- La Région wallonne a publié des conseils en termes d'utilisation de produits numériques sur son site Internet dédié au développement durable. On y trouve des recommandations pour une utilisation éco-responsable des produits numériques [86], ainsi qu'une brochure didactique à l'attention des plus jeunes [87].

En association avec l'UCM, la publication d'un guide permet aux entreprises de diminuer l'impact énergétique de leur informatique [88].

- Pour la Région Bruxelles-Capitale, dans son Livre Blanc concernant les enjeux de la transformation numérique au service des citoyens, le centre d'Informatique pour la Région bruxelloise prévient des conséquences sur l'environnement mais ne fournit aucune recommandation pour réduire la production de gaz à effet de serre liée à l'usage d'Internet [89]. Seul Le Label Entreprise Ecodynamique délivré par Bruxelles environnement, impose la mise en place de bonnes pratiques permettant de réduire les besoins énergétiques des entreprises qui désirent l'obtention du label. Parmi ces bonnes pratiques, on trouve par exemple, l'allongement de la durée de vie du parc informatique avant son remplacement [90].
- La Région flamande promulgue l'utilisation des outils numériques dans le cadre d'une économie circulaire mais sans avertir la population et les entreprises des dangers d'un usage intensif de ces produits [91].

Parallèlement aux organisations gouvernementales, des associations tentent par diverses actions de sensibiliser les entreprises et le grand public sur l'importance de l'impact environnemental de l'usage intensif des produits numériques:

- L'organisation *Green It Belgium* offre un ensemble de conseils et de services permettant aux entreprises de marier compétitivité et respect de l'environnement.
- L'association *écoconso.be* publie des recommandations sur son site Internet pour diminuer l'impact du numérique à l'attention des consommateurs et des entreprises, mais elle s'adresse également aux pouvoirs publics en leur demandant de ne pas ignorer le problème de la crise climatique au moment de déployer la 5G [83].

Cette liste n'est pas exhaustive mais elle montre que la Belgique a les moyens d'agir auprès de ses citoyens et de ses entreprises pour leur faire prendre conscience de l'impact sur l'environnement de l'utilisation des produits numériques. La conscientisation passera par l'intensification de la communication de ces services et de ces publications, en faveur d'un usage éco-responsable des outils numériques.

4.5 Gestion de fin de vie

État des lieux

Cette partie porte sur les diverses étapes et les différents intervenants relatifs à la gestion de fin de vie des appareils électroniques en Belgique. La première étape consiste à collecter le matériel électronique qui n'est plus utilisé et considéré comme un DEEE. Ensuite, il faut trier ce matériel récolté. Les appareils en ordre de marche ou réparables peuvent être orientés vers un circuit de vente de matériels d'occasion. Les appareils hors d'usage ou trop vétustes sont traités par des centres qualifiés chargés de récupérer un maximum de composants pour réduire autant que possible la quantité de résidus non valorisés. Une ou plusieurs organisations peuvent intervenir dans la prise en charge de ces différentes étapes.

Les chemins que vont suivre les DEEE et les acteurs qui prendront en charge le traitement de ces DEEE, dépendront du flux que suivront ces appareils. Dans son étude de 2013 [92], la société FFact fait la distinction entre les flux enregistrés et les flux non enregistrés.

Pour son dernier rapport annuel final, publié en 2018, Recupel a demandé à la société Deloitte d'effectuer une analyse approfondie des flux des DEEE [93]. Dans cette étude, Deloitte affine cette distinction de flux en scindant les flux non enregistrés en flux non enregistrés documentés et non documentés.

4.5.1 Flux enregistrés

Cette catégorie regroupe la filière des centres agréés de traitement des DEEE, qui consignent les quantités d'appareils qu'ils traitent.

Parmi ceux-ci, on trouve des centres de collecte, de tri et éventuellement de revente de matériel d'occasion, regroupés dans la colonne de gauche de la Figure 14. Les appareils hors d'usage sont pris en charge par différents groupes de centres de traitement illustrés dans la colonne de droite de la Figure 14.

Dans l'encadré de la Figure 14, on trouve les 4 formules possibles d'enregistrement des volumes d'appareils traités: via Recupel, via BeWeee, les registres de déchets ou le plan individuel.

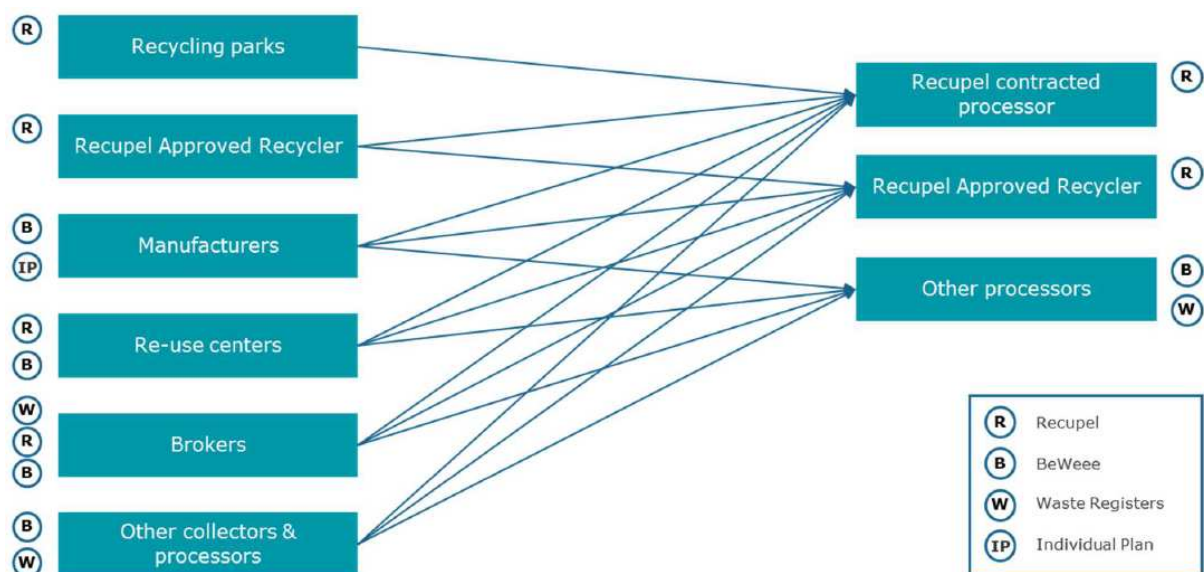


Figure 14 : Flux des DEEE enregistrés [93]

Recupel

Depuis 2001, l'asbl Recupel a été mandatée pour prendre en charge en Belgique la collecte, le tri, le traitement et le recyclage des DEEE. Le Département du Sol et des Déchets de la Région wallonne, dans son rapport d'évaluation sur les DEEE [94], indique que « L'asbl RECUPEL a été créée par les importateurs et producteurs d'appareils électriques et électroniques, à la suite des conventions environnementales conclues avec les différentes autorités régionales du pays. »

En 2020, Recupel compte 543 **parcs de recyclage** (Recycling Parks) dans tout le pays gérés par des intercommunales [95]. Le flux de DEEE collectés est entièrement pris en charge par Recupel, ce qui implique que tous les DEEE collectés dans les parcs de recyclage finissent par se retrouver dans un centre de traitement sous contrat Recupel.



Figure 15 : Point de recyclage Recupel [96]

On peut y ajouter les centaines de points de recyclage petit électro installés dans des espaces commerciaux ouverts au public où le consommateur peut déposer ses DEEE .

Pour la collecte auprès des professionnels, Recupel offre la possibilité aux entreprises de devenir membre de Recupel et de profiter des services de Recupel pour la reprise et le traitement des DEEE. Pour les entreprises qui ont des quantités limitées d'équipements hors d'usage (moins de 4 Box-palettes par an), Recupel a créé la plate-forme Smartloop, leur offrant la possibilité de faire appel à des recycleurs agréés chargés d'emporter et de traiter les DEEE encombrants de leur entreprise [96].

Les centres de traitement sous contrat Recupel (Recupel contracted processors) sont des recycleurs qui ont un accord contractuel avec Recupel pour le traitement des DEEE que Recupel collecte. Dans son rapport de 2018, Deloitte dénombre 10 centres de traitement sous contrat Recupel.

Les recycleurs agréés Recupel (Recupel Approved Recyclers) (annexe A.2) sont des opérateurs qui ont signé un accord avec Recupel pour collecter et traiter les DEEE. Parmi les recycleurs agréés, il faut faire la distinction entre les collecteurs et les centres de traitement.

- Au total, Recupel compte 59 collecteurs. Ces sociétés transportent les DEEE vers les centres de traitement agréés.
- Quant aux centres de traitement, 14 sont agréés par Recupel. Ils peuvent soit traiter les DEEE eux-mêmes, soit choisir d'amener les DEEE vers un autre centre de traitement agréé éventuellement plus spécialisé.

Outre les recycleurs agréés Recupel, il existe également des entreprises de collecte et de traitement des déchets qui ne collaborent pas avec Recupel (Others collectors & processors). Ces entreprises peuvent soit transporter les DEEE vers un recycleur agréé Recupel ou un centre de traitement sans licence (en Belgique ou à l'étranger), soit recycler les DEEE eux-mêmes. Les chiffres sur ce flux peuvent être trouvés auprès de BeWeee et dans les registres des déchets.

BeWeee

L'asbl BeWeee, fondée en 2018 par un consortium d'organisations et d'entreprises actives dans le traitement des DEEE [97], regroupe les acteurs de la chaîne de traitement des déchets qui ne sont pas des recycleurs agréés Recupel mais qui via l'application accessible sur le site de BeWeee, répondent à leurs obligations

européennes de reporting relatives aux DEEE [18]. Cette mise à disposition d'un outil de compte rendu supplémentaire a pour objectif de mettre au jour davantage de flux de déchets afin d'aider la Belgique à atteindre les objectifs de l'Union européenne de collecter 65 % du volume d'appareils électroniques et électriques mis sur le marché [98].

Registres des déchets (Waste Registers)

Sur l'ensemble du territoire, les entreprises réalisant des opérations de valorisation ou d'élimination de DEEE sont contraintes de tenir un registre compilant les données relatives aux traitements des déchets dangereux auxquels appartiennent les DEEE. Chacune de ces entreprises est tenue de déclarer annuellement les données consignées dans son registre de déchets auprès de son autorité régionale respective. Dans ces registres sont généralement indiqués la quantité, la nature, la composition des déchets, le numéro d'identification du collecteur qui collecte les déchets, la méthode de traitement des déchets et le nom, l'adresse et le numéro d'identification du transformateur... [99][100]

Plan individuel (Individual Plan)

Certains **fabricants d'EEE** (manufacturers) choisissent de gérer eux-mêmes leurs flux de déchets et constituent un plan individuel d'obligation de reprise ou un plan individuel de prévention et de gestion des déchets. Ce plan doit être rapporté à leur autorité régionale [101]. Les fabricants qui n'ont pas de plan individuel sont obligés de devenir membres de Recupel pour déclarer leur quantité de DEEE mise sur le marché.

Centres de réutilisation et Brokers

Les DEEE dans **les centres de réutilisation** (Re-use centers) peuvent sortir du marché de deux manières différentes:

1. L'équipement est remis à neuf et remis sur le marché.
2. L'équipement n'est pas réparable et est collecté et orienté dans un centre de traitement.

25 de ces centres de réutilisation sont agréés et collaborent avec Recupel. D'autres sont inscrits sur la plate-forme BeWeee et pour le reste, les quantités traitées sont inscrites dans les registres de déchets.

Les **Brokers**, qu'on peut définir comme des négociants en recyclage, sont des sociétés spécialisées dans l'achat, la rénovation et la vente d'EEE d'occasion. Les Brokers fonctionnent de la même manière que les centres de réutilisation. Cependant, les appareils sortis du marché chez les Brokers ne sont pas enregistrés dans les registres des déchets car ces derniers ne sont pas inscrits comme des entreprises productrices de déchets. Les informations sur les EEE traités des Brokers sont incluses dans les chiffres de Recupel ou dans BeWeee.

4.5.2 Flux non enregistrés documentés

Dans cette section, se trouvent les filières qui ne sont pas agréées mais pour lesquelles l'étude de Deloitte a pu documenter le flux des DEEE.

Les DEEE en ferraille

Une partie de ces flux est le résultat de l'acheminement et du traitement des DEEE chez des ferrailleurs locaux (Local scrap dealers) qui collectent dans des zones géographiques limitées et traitent les DEEE inclus dans la ferraille métallique.

En raison de leur composition comportant une quantité importante de métaux, les ferrailleurs locaux démontent les DEEE afin de récupérer les parties métalliques qui sont annexées à la ferraille ordinaire. Ensuite, comme le montre la Figure 16, du distributeur de ferraille local, le tout est revendu à des ferrailleurs nationaux (National scrap dealers). Ces derniers possèdent une ou plusieurs installations de broyage pour déchiqueter les déchets métalliques légers, contenant potentiellement des parties de DEEE.

Les fractions de DEEE qui sont amalgamées aux déchets métalliques communs constituent une fuite de données car elles ne sont pas répertoriées dans les flux enregistrés des DEEE.

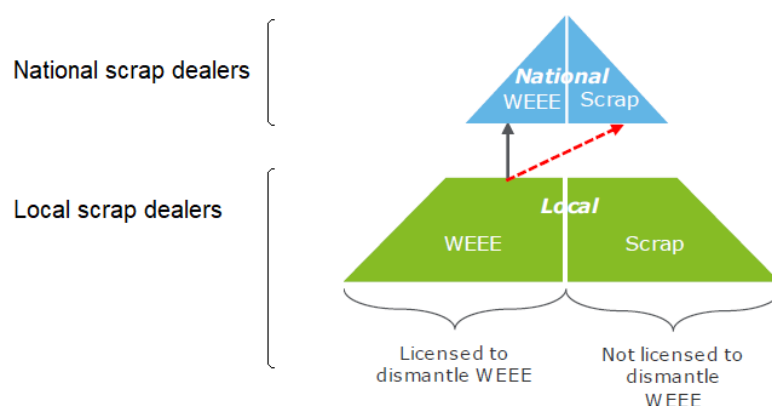


Figure 16 : Structure du marché belge des ferrailleurs recycleurs de DEEE [93]

L'exportation de DEEE réutilisables

Ce flux correspond à du matériel fonctionnel ou réparable qui est revendu en seconde main à l'étranger et qui ne pourra plus être collecté et traité en Belgique une fois arrivé en fin de vie. La plupart des organisations qui participent à ce commerce n'ont pas l'autorisation et ne sont pas identifiées en tant qu'entreprises de collecte et de traitement des DEEE.

L'exportation de DEEE hors d'usage

Ce flux a été documenté sur la base de sources alternatives et en ayant effectué des vérifications croisées avec les flux de rapports officiels existants. Il en résulte deux types d'exportation de DEEE: une exportation notifiée concernant le matériel en fin de vie qui est légalement exporté, et par opposition, une exportation non notifiée correspondant à l'exportation illégale de DEEE.

Les DEEE dans les déchets municipaux

La catégorie des DEEE dans les déchets municipaux est principalement constituée de petits DEEE jetés dans les poubelles et incinérés, comme par exemple des clés USB. Des déchets professionnels font rarement partie de cette catégorie.

4.5.3 Flux non enregistrés et non documentés

Le reste correspond aux flux de DEEE qui ne sont, d'une part, pas authentifiés dans les flux enregistrés, et d'autre part, pour lesquels les données récoltées sont absentes ou pas assez fiables que pour être incluses aux flux documentés par l'étude de Deloitte.

4.5.4 Synthèse du rapport de Deloitte [93]

Se basant sur des informations fournies par Recupel et les données des plans individuels, Deloitte a calculé la moyenne de la quantité de produits mis sur le marché pour les années 2014, 2015 et 2016. Le résultat obtenu s'élève à 172 540 tonnes par an. En comparant ce chiffre et les résultats du Tableau 11 publiés dans le rapport de Deloitte portant sur l'année 2016, on peut voir que Recupel, qui traite l'ensemble des DEEE qui suivent la filière officielle, ne recueille que 46,8 % de la totalité des déchets électroniques générés.

Tableau 11 : Quantités des équipements électroniques traités en 2016

Source: adapté du rapport de Deloitte [93]

	Poids en kT	
Quantité mise sur le marché*	172,54	100,00%
-> Enregistrés	79,51	46,08%
--> Recupel	71,44	41,40%
--> Plans individuels	1,7	0,99%
--> Complément BeWeee	4,29	2,49%
--> Registres des déchets	2,08	1,21%
-> Non enregistrés	93,02	53,91%
--> Documentés	33,72	19,54%
---> DEEE en ferraille	8,45	4,90%
---> Exportation DEEE réutilisables	17,28	10,02%
---> Exportation DEEE hors d'usage	4,31	2,50%
----> Exportation notifiée	1,74	1,01%
----> Exportation non notifiée	2,57	1,49%
---> DEEE dans les déchets municipaux	3,68	2,13%
--> Non documentés	59,3	34,37%

* La quantité mise sur le marché correspond à la moyenne des quantités mises sur le marché pour les années 2014, 2015 et 2016. Cette catégorie comprend: les petits objets, les petits produits IT et produits électroniques grand public, jouets, écrans de télévision et d'ordinateur, ainsi que les équipements professionnels et spéciaux, y compris de

grands équipements de réseaux IT, de grands équipements médicaux pour les hôpitaux et de grands outils et jouets professionnels.

En conclusion de l'étude de Deloitte, le taux de collecte total des déchets électroniques en 2016 a atteint 113,23 kT ou 65,63 % de la quantité mise sur le marché.

- Le taux de collecte total sur les flux enregistrés: 79,51 kT ou 46,08 % de la quantité mise sur le marché
- Le total des flux documentés: 33,72 kT ou 19,54 % de la quantité mise sur le marché
- Le total des flux non documentés: 59,30 kT ou 34,37 % de la quantité mise sur le marché

4.5.5 Traitement des DEEE dans les centres agréés Recupel

Suite à la collecte par Recupel, les DEEE sont conduits et pris en charge par des centres de transbordement où le personnel estime leur potentiel de réutilisation. Dans son article de 2018, Gonda et al. estiment à 25 % les ordinateurs collectés qui peuvent être réutilisés ou être réparés [3].

Les appareils réutilisables seront emmenés par les équipes des centres de réutilisation agréés Recupel. Pour l'année 2020, Recupel indique sur son site Internet qu'il collabore avec 25 centres de réutilisation. Ces centres, principalement des entreprises d'économie sociale, revendent les équipements à prix réduit après avoir réparé les appareils endommagés.

Le matériel irréparable est acheminé vers des usines de traitement où il est démantelé. Comme préconisé dans l'étude de Van Eygen et al. de 2016 [5], les appareils subissent dans un premier temps une dépollution manuelle:

1. Le premier traitement consiste à éliminer les substances dangereuses comme les batteries qui contiennent du cadmium, ou les substances contenues dans le verre des tubes cathodiques: plomb, baryum et poudre métallique luminescente.
2. Une seconde étape manuelle permet l'extraction des éléments contenant des métaux nobles tels que l'or, l'argent et le titane, qui constituent de nouvelles matières premières pures.

Une fois ces opérations manuelles effectuées, les autres composants sont traités et triés mécaniquement:

1. Les composants des appareils sont broyés dans une déchiqueteuse de laquelle sortent des fragments de toutes natures.
2. A la sortie de la déchiqueteuse, des aimants puissants séparent les métaux ferreux tels que le fer et l'acier des autres composants.
3. Ensuite, des champs magnétiques générés par des courants électriques séparent les métaux non-ferreux comme l'aluminium, des autres matériaux comme par exemple le PVC.
4. Une quatrième étape, qui fait appel à la technique de passage d'air, permet de séparer les matériaux plus légers des matériaux les plus lourds et aspire la poussière.
5. Enfin, des tables de séparation densimétriques font couler les matériaux lourds comme le verre et laissent flotter les matériaux plus légers tels que le plastique.

En fin de processus:

- Les déchets recyclables sont exploités en tant que matière secondaire utilisable dans les procédés de fabrication pour remplacer la matière première initiale.
- Les matières non recyclables sont utilisées comme combustible dans des procédés de récupération d'énergie.
- Ce qui ne peut pas être recyclé ou incinéré est éliminé en décharge.

Recupel indique que ces procédés mis en place dans les centres de traitements agréés permettent d'atteindre 90,6 % de valorisation pour le traitement de l'ensemble des DEEE. Pour les déchets électroniques, écrans et autres, la valorisation de l'ensemble des matériaux atteint respectivement 80,39 % et 89,54 %, comme le montrent la Figure 17 et la Figure 18 [102].

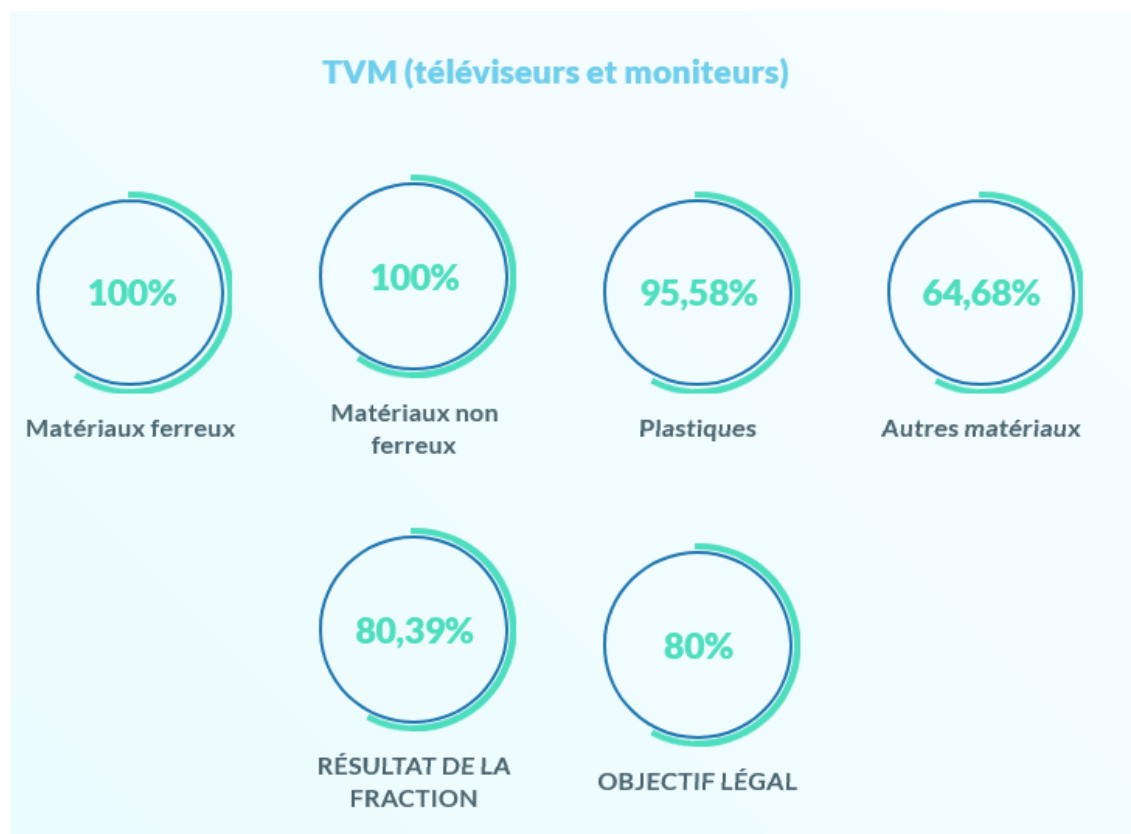


Figure 17 : Valorisation des TVM dans les centres de traitement agréés Recupel[102]

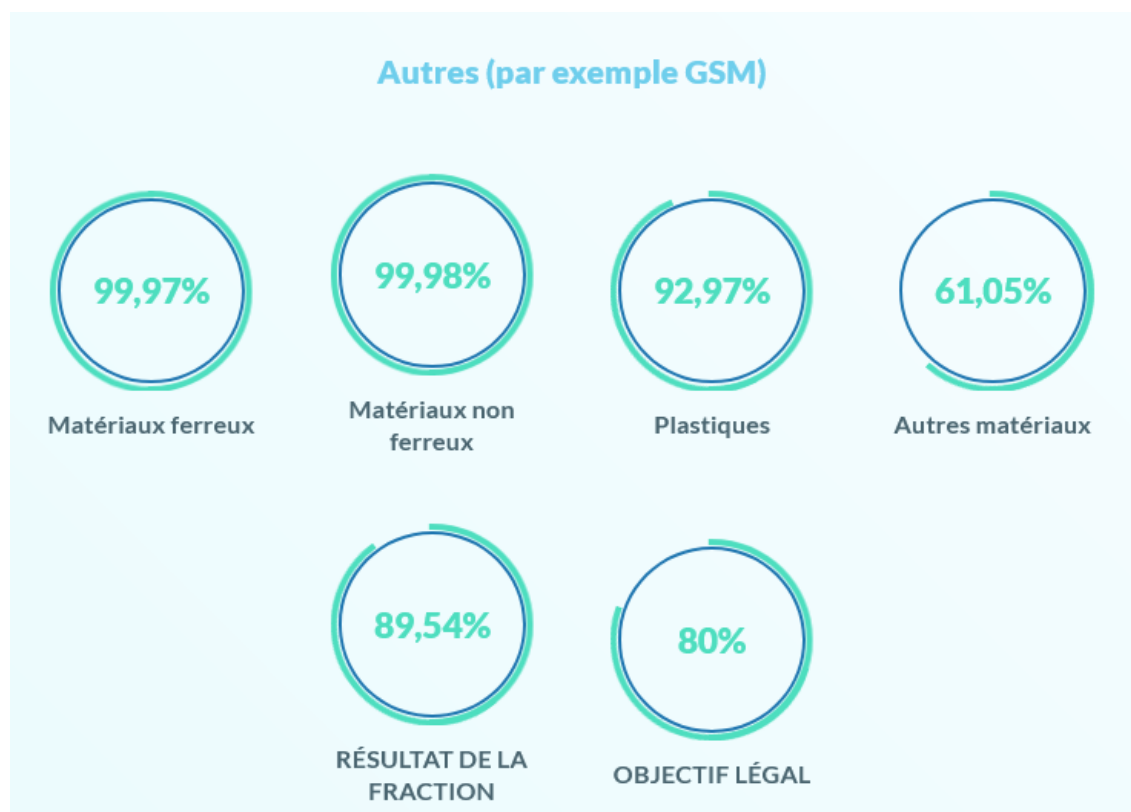


Figure 18 : Valorisation des produits électroniques (à l'exception des TVM) dans les centres agréés Recupel [102]

Pistes d'amélioration

En Belgique, les méthodes de valorisation des DEEE semblent particulièrement efficaces puisque, comme indiqué au point 4.5.5, les procédures mises en place par Recupel permettent d'optimiser la réutilisation et le recyclage à plus de 80 % des composants constituant les équipements électroniques. De cette manière, la quantité de ce type de déchets conduit en décharge est réduite et par conséquent, la pollution évoquée dans l'article de Li et al. [10], liée à ces composants est moindre.

Le point sensible reste l'étape de collecte. Le rapport pour 2016 de Deloitte montre que le total des flux enregistrés et non enregistrés mais documentés des DEEE, atteint 68 % des appareils mis sur le marché. Bien que cette quantité réponde aux exigences de 65 % de la directive européenne définissant les objectifs de ramassage pour les DEEE comme indiqué dans l'article de Friege et al. [6], cette directive indique également qu'« Un traitement spécifique des DEEE est indispensable afin d'éviter la dispersion de polluants dans les matériaux recyclés ou dans le flux des déchets. ... Il importe que tout établissement ou toute entreprise qui effectue des opérations de collecte, de recyclage ou de traitement réponde à des normes minimales pour prévenir les répercussions négatives du traitement des DEEE sur l'environnement. » [18]

Or, l'assurance d'un recyclage visant à mettre en place des conditions optimales de traitement et à réduire la production de matières premières perdues n'est garantie qu'auprès des centres de traitement agréés qui collaborent avec Recupel, des entreprises qui déclarent les DEEE dans leur plan individuel, des déclarations via l'outil de reporting BeWeee et des registres des déchets des entreprises. Au total, cela représente 48,44 % des appareils mis sur le marché.

1) Homologation des acteurs actifs dans les flux non enregistrés documentés

- Sur son site, Recupel s'engage à tout mettre en œuvre pour que les 20 % que constituent les flux documentés mais non enregistrés deviennent des flux officiellement déclarés. D'après les recommandations de Deloitte, il conviendrait pour cela que tous les collecteurs et les recycleurs qui couvrent le marché du recyclage soient tenus de remettre leurs DEEE à Recupel.
- Sur base des données déclarées par les entreprises qui fabriquent des EEE et qui rédigent un plan individuel, le Tableau 12 extrait de l'étude de Deloitte montre

qu'il y a une différence significative qu'il faudrait résorber entre la quantité de produits mis sur le marché (POM¹ dans le Tableau 12) et la quantité de produits en fin de vie traités par ces entreprises (OOM² dans le Tableau 12).

Tableau 12 : Différences POM et OOM dans les plans individuels entre 2014 et 2016 [93]

Individual plans			
	2014	2015	2016
POM (kton)	4,49	4,20	4,25
OOM (kton)	1,84	2,11	1,70
OOM/POM	41,04%	50,23%	40,00%

- Il est également recommandé aux ferrailleurs de traiter séparément les DEEE de la ferraille ordinaire et de déclarer les composants récoltés à Recupel. Toutefois, Deloitte fait remarquer que sur base d'une enquête qu'ils ont menée auprès des ferrailleurs, cette opération de tri est difficile et que peu de ferrailleurs la réalisent. Ils mettent particulièrement en évidence la difficulté de traiter les très petits DEEE ou les DEEE difficiles à distinguer de la ferraille classique. Le rapport met l'accent également sur le fait que les petits ferrailleurs locaux ne sont pas agréés pour recycler les DEEE. De ce fait, ils ne déclarent pas aux autorités locales les quantités de DEEE qu'ils brassent. Il est donc essentiel que ces acteurs soient identifiés et qu'ils collaborent avec Recupel pour la portion de DEEE qu'ils traitent.

2) Enregistrement des DEEE exportés

Avec plus de la moitié des flux non enregistrés documentés, l'exportation des DEEE représente la part la plus importante de cette catégorie (Tableau 11). Pour permettre un enregistrement de ces flux, plusieurs recommandations sont proposées par Recupel et Deloitte:

- L'une des mesures proposées est d'établir une coopération avec les douanes permettant:
 - de centraliser l'enregistrement de l'exportation des DEEE;
 - de contrôler le transport routier des DEEE;

¹ Put On Market

² Out Of Market

- d'enregistrer le flux des appareils qui ne peuvent pas être réparés par des centres de réparation en Belgique ou les composants cassés retirés des appareils réparés qui sont envoyés à des fabricants situés à l'étranger.
- Il est nécessaire de répertorier tous les centres de réutilisation qui collectent, reconditionnent et revendent des appareils informatiques d'occasion. Deloitte indique que tous ne sont pas autorisés à le faire. Par conséquent, pour ces centres de réutilisation, il n'y a pas d'enregistrement de collecte. En outre, un certain nombre de centres de réutilisation ont une licence mais ne relèvent pas des autorités régionales ou de Recupel.
- Il faut également inventorier tous les brokers qui effectuent des activités de collecte et de réutilisation et qui ne sont pas légalement autorisés à le faire. Sans cette mesure, ils ne sont pas obligés de déclarer les DEEE qu'ils collectent et traitent et, par conséquent, glissent entre les mailles des flux enregistrés.

3) Identification des flux non enregistrés et non documentés

Recupel insiste sur la nécessité de mettre en place des mesures concrètes et contraignantes pour l'enregistrement des flux des DEEE et appelle tous les acteurs de la collecte et du recyclage à respecter des règles strictes et des contrôles réguliers.

Recupel rappelle que l'enregistrement sur la plate-forme BeWeee permet d'apporter une solution au problème de ces flux invisibles.

5 Conclusion

Ce mémoire avait comme objectif d'analyser chacune des étapes du cycle de vie des produits électroniques à l'échelle de la Belgique. Le but était de déterminer quelles étaient les procédures mises en place et les pistes d'amélioration possibles pour réduire l'impact environnemental du traitement par la Belgique de ces équipements en fin de vie.

Pour atteindre cet objectif, une première étape consistait à réaliser un état de l'art des articles scientifiques traitant spécifiquement de la gestion des DEEE en Belgique. Cette recherche nous a permis de mettre en évidence quatre thèmes prédominants permettant de classer l'ensemble des articles: le recyclage, l'impact environnemental, la mise en décharge et la collecte. Cette étude a montré que les articles scientifiques sont essentiellement axés sur la gestion de fin de vie, dernière étape du cycle de vie. Bien que certains articles y fassent allusion, les étapes précédant cet ultime traitement ne sont pas détaillées.

Pour compléter les résultats obtenus par l'état de l'art, c'est via des recherches effectuées sur les ressources qu'offre Internet qu'ont été analysées les étapes du cycle de vie à l'échelle de la Belgique. Cette analyse a permis de mettre en évidence les procédés de gestion des équipements électroniques sur toute la durée de leur cycle de vie. Dès lors, elle a permis de mettre en évidence les points faibles et de proposer des pistes d'amélioration pour réduire l'impact environnemental des procédés mis en place pour la gestion de ces équipements. On en conclut qu'à chaque étape, la Belgique est en mesure d'améliorer les procédés de traitement liés au cycle de vie des équipements électroniques pour en réduire l'impact environnemental.

Bien que ce mémoire soit le résultat d'une analyse approfondie du cycle de vie des DEEE en Belgique, il n'est le reflet que de l'état des lieux des dernières méthodes de gestion mises en place à ce jour.

Une piste d'amélioration serait d'étudier l'évolution des techniques de gestion de manière chronologique. Malheureusement, cette analyse risquerait d'être trop volumineuse en termes d'informations que pour faire l'objet d'un mémoire.

Une autre piste d'amélioration serait de faire l'analyse du cycle de vie d'un produit fabriqué en Belgique. Cependant ce type d'analyse est tellement complexe

techniquement et soumise à de nombreuses normes qu'elle ne peut pas s'envisager dans l'optique d'un mémoire réalisé par une personne seule.

6 Bibliographie

- [1] GONDA, Louise, D'ANS, Pierre et DEGREGZ, Marc, 2019. A Comparative Assessment of WEEE Collection in an Urban and Rural Context: Case Study on Desktop Computers in Belgium. *Conservation and Recycling*, vol. 142, mars 2019, p. 131-142. ScienceDirect, doi:10.1016/j.resconrec.
- [2] Peeters, Jef R., et al, 2018. Forecasting the Recycling Potential Based on Waste Analysis: A Case Study for Recycling Nd-Fe-B Magnets from Hard Disk Drives. *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, février 2018, p. 96-108. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.080.
- [3] Gonda, Louise, et Marc Degrez, 2018. End-of-Life Management of Computers in Brussels: Environmental Comparison of Two Treatment Chains. *Procedia CIRP*, vol. 69, p. 968-73. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.procir.2017.11.089.
- [4] Vanegas, Paul, et al, 2017. Improvement Potential of Today's WEEE Recycling Performance: The Case of LCD TVs in Belgium. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 11, no 5, octobre 2017, p. 13. DOI.org (Crossref), doi:10.1007/s11783-017-1000-0.
- [5] Van Eygen, Emile, et al, 2016. Resource Savings by Urban Mining: The Case of Desktop and Laptop Computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 107, février 2016, p. 53-64. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.032.
- [6] Friege, Henning, et al. « Optimising Waste from Electric and Electronic Equipment Collection Systems: A Comparison of Approaches in European Countries ». *Waste Management & Research*, vol. 33, no 3, mars 2015, p. 223-31. DOI.org (Crossref), doi:10.1177/073
- [7] Vanegas, Paul, et al. « Synergizing Industrialized and Developing Countries to Improve Resource Recovery for e-Waste: Case Study Belgium–Kenya ». *Procedia CIRP*, vol. 15, 2014, p. 283-88. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.procir.2014.06.089.
- [8] De Meester, Steven, et al. « Using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment in Decision Support: A Case Study on WEEE Valorization in Belgium ». *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 142, mars 2019, p. 1-9. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.
- [9] Tran, P. H., Van Eygen, E., De Meester, S., & Dewulf, J. (2016). An assessment of resource conservation in WEEE management from a life cycle perspective : a case study of E-scrap recycling in Belgium. SETAC Europe LCA Case Study symposium, 22nd, Abstracts. Presented at the 22nd SETAC Europe LCA Case Study symposium.

- [10] Li, F., Wu, J., & Dong, Z. (2010). Influence of MSW Landfill on Surrounding Geological Environment and Control Strategies. *Earth and Space* 2010. [https://doi.org/10.1061/41096\(366\)59](https://doi.org/10.1061/41096(366)59)
- [11] Electronic waste and organized crime-assessing the links. (2009). *Trends in Organized Crime*, 12(3-4), 352-378. <https://doi.org/10.1007/s12117-009-9076-y>
- [12] Jones, P. T., Geysen, D., Tielemans, Y., Van Passel, S., Pontikes, Y., Blanpain, B., ... Hoekstra, N. (2013). Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 55, 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.021>
- [13] Barsalou, O., & Picard, M. H. (2018). International Environmental Law in an Era of Globalized Waste. *Chinese Journal of International Law*, 17(3), 887-906. <https://doi.org/10.1093/chinesejil/jmy016>
- [14] Bol, D., De Vos, J., Botman, F., de Streel, G., Bernard, S., Flandre, D., & Legat, J.-D. (2013). Green SoCs for a sustainable Internet-of-Things. 2013 IEEE Faible Tension Faible Consommation. <https://doi.org/10.1109/ftfc.2013.6577767>
- [15] Willems, B., Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2007). Pressure-triggered active fasteners: Design results using topology optimization. *Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*. <https://doi.org/10.1109/isee.2007.369391>
- [16] Wikimedia Foundation Inc. (2020, 13 juillet). Electronics. <https://en.wikipedia.org/wiki/Electronics>, dernière mise à jour: 13 juillet 2020, date de consultation: 13 août 2020
- [17] Wikimedia Foundation Inc. (2020, 20 juillet). Déchets d'équipements électriques et électroniques. https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chets_d%27%C3%A9quipements_%C3%A9lectriques_et_%C3%A9lectroniques, dernière mise à jour: 20 juillet 2020, date de consultation: 13 août 2020
- [18] Journal officiel de l'Union européenne, (2012, juillet 4). DIRECTIVE 2012/19/UE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).
- [19] Kitchenham B. A. and Charters S. 2007. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Version 2.3, EBSE Technical Report, EBSE-2007-01, Keele University.
- [20] Wikimedia Foundation Inc., 2020, *List of academic databases and search engines*, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_academic_databases_and_search_engines, dernière mise à jour: 11 février 2020, date de consultation: 15 février 2020

- [21] Dewulf, Wim, et al. « Diversified Recycling Strategies for High-End Plastics: Technical Feasibility and Impact Assessment ». CIRP Annals, vol. 68, no 1, 2019, p. 29-32. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.cirp.2019.04.004.
- [22] Qualtrics. (2019, janvier 9). Cycle de vie d'un produit définition et phases. Consulté le 12 mai 2020, à l'adresse <https://www.qualtrics.com/fr/gestion-de-l-experience/produit/cycle-vie-produit/>
- [23] Les cahiers du développement durable. (2012, octobre). L'analyse du cycle de vie. Consulté 17 juin 2020, à l'adresse <http://les.cahiers-developpement-durable.be/outils/analyse-du-cycle-de-vie/>
- [24] Service Public Fédéral Belge. (s. d.). Economie circulaire. Consulté 24 juillet 2020, à l'adresse https://www.belgium.be/fr/economie/developpement_durable/economie_durable/economie_circulaire
- [25] EcoInfo. (2014, 11 avril). Les matériaux dans les équipements terminaux. Consulté 15 juin 2020, à l'adresse <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/04/11/les-materiaux-dans-les-equipements-terminaux/>
- [26] Wedig, M. (s. d.). Matières premières : sécurité d'approvisionnement et technologies d'avenir. Consulté le 18 avril 2020, à l'adresse <https://books.openedition.org/septentrion/15969?lang=fr#illustrations>
- [27] Hancock, N. (2017, mars 9). Exploitation minière et la pollution de l'eau. Consulté le 13 mai 2020, à l'adresse <https://www.safewater.org/french-fact-sheets/2017/3/9/exploitation-mini%C3%A8re-pollution>
- [28] Le groupement de service EcoInfo. (2010, août 6). Quels impacts ? Consulté le 13 mai 2020, à l'adresse <https://ecoinfo.cnrs.fr/2010/08/06/4-quels-impacts/>
- [29] Kirsten Hund, & Erik Reed. (2019, mai 8). La transition vers un avenir sobre en carbone passe par la préservation des forêts. Consulté le 16 mai 2020, à l'adresse <https://blogs.worldbank.org/fr/voices/transition-vers-avenir-sobre-en-carbone-deforestation>
- [30] Cécile Grégoriades. (2007, juin 14). Ordinateurs, pollueurs. *Le Monde.fr*. Consulté le 18 mai 2020, à l'adresse https://www.lemonde.fr/technologies/article/2007/06/14/ordinateurs-pollueurs_916629_651865.html
- [31] ADEME. (2019, novembre). La face cachée du numérique (8710). ISBN 979-10-297-1455-9. Consulté à l'adresse <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-face-cachee-numerique.pdf>
- [32] Ministère de la transition écologique et solidaire. (2020, 31 janvier). Déchets d'équipements électriques et électroniques. Consulté 17 juin 2020, à l'adresse

- <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/dechets-dequipements-electriques-et-electroniques>
- [33] Rana Ramjaun. (2019, juin 24). Pollution numérique : quels impacts sur l'environnement ? *My Connecting*. Consulté le 18 mai 2020, à l'adresse <https://www.myconnecting.fr/formation/pollution-numerique-impacts/>
 - [34] OCDE. (2017). Les incidences sur l'environnement du transport de marchandises. Consulté le 20 mai 2020, à l'adresse <https://www.oecd.org/fr/environnement/envech/2386739.pdf>
 - [35] Yiou, P. (2015). Le temps s'est-il détraqué ? Paris, France : Buchet/Chastel. Consulté le 20 mai 2020, à l'adresse <http://www.buchetchastel.fr/data/extrait/9782283028308.pdf>
 - [36] Impact environnemental du transport routier. (s. d.). In Wikipedia. Consulté 15 mai 2020, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_environnemental_du_transport_routier
 - [37] Belgian Earth Observation. (2019, 22 août). Pollution marine. Consulté 7 juin 2020, à l'adresse <https://eo.belspo.be/fr/pollution-marine>
 - [38] ONDRAF. (s. d.). Sortes de déchets radioactifs. Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies. Consulté 10 juin 2020, à l'adresse <https://www.ondraf.be/sortes-de-dechets-radioactifs>
 - [39] Catherine Demaison, Laurence Grivet, Denise Maury-Duprey, Séverine Mayo-Simbsler. (2019). Impacts environnementaux du numérique. In Insee Références (Éd.), L'économie et la société à l'ère du numérique (édition 2019 éd., p. 134-135). MONTROUGE, France : Institut national de la statistique et des études économiques.
 - [40] Gary Cook, Jude Lee, Tamina Tsai, Ada Kong, John Deans, & Brian Johnson. (2017, janvier). Clicking clean: Who is winning the race to build a green Internet? (Nancy Bach & Elizabeth Jardim, Éd.). Washington, D.C. 20001, United States : Greenpeace Inc.
 - [41] The Shift Project, & Hugues Ferreboeu. (2018, mars). -Lean ICT- pour une sobriété numérique (Rapport final v8). Consulté à l'adresse https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/05/2018-05-17_Rapport-interm%C3%A9diaire_Lean-ICT-Pour-une-sobri%C3%A9t%C3%A9-num%C3%A9rique.pdf
 - [42] Lamia El Bouchtioui. Le recyclage est-il l'unique solution pour une gestion durable des DEEE ? Étude de l'incidence du contexte réglementaire et des politiques publiques sur les filières développées en France. Déchets sciences et techniques {En ligne}, N°75, mis à jour le : 10/01/2018, URL : <http://lodel.irevues.inist.fr/dechets-sciences-techniques/index.php?id=3686>,

<https://doi.org/10.4267/dechets-sciences-techniques.3686>

- [43] Agence de la transition écologique. (2018, 18 juin). Qu'est-ce que l'ACV ? Consulté 3 juin 2020, à l'adresse <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>
- [44] Organisation internationale de normalisation. (2020, 9 avril). ISO 14000 — Management environnemental. Consulté 3 juin 2020, à l'adresse <https://www.iso.org/fr/iso-14001-environmental-management.html>
- [45] Pôle éco-conception. (2008). Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'ACV, c'est quoi ? Consulté 3 juin 2020, à l'adresse <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>
- [46] Wikimedia Foundation Inc., (2020). Analyse du cycle de vie. https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_du_cycle_de_vie, dernière mise à jour: 22 avril 2020, date de consultation: 3 juillet 2020
- [47] Youmatter. (2019, 3 octobre). Analyse de Cycle de Vie (ACV) : définition et exemples. Consulté 3 juillet 2020, à l'adresse <https://youmatter.world/fr/definition/definition-analyse-cycle-vie-acv-exemple/>
- [48] Orée. (2014, avril 23). Guide de l'éco-conception des produits et services. Consulté le 8 juin 2020, à l'adresse <http://ecoconception.oree.org/eco-conception-definition.html>
- [49] Youmatter. (2020, février 11). Éco-conception: définition de l'éco-conception (réglementation et exemple). Consulté le 8 juin 2020, à l'adresse <https://youmatter.world/fr/definition/eco-conception-definition/>
- [50] Journal officiel de l'Union européenne, (2019, octobre 21). DIRECTIVE 2009/125/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie.
- [51] Agence de la transition écologique. (2019, 15 avril). Les enjeux de l'écoconception, les bénéfices pour l'entreprise, pour l'économie et l'environnement. Pourquoi écoconcevoir son produit ? Consulté 3 juillet 2020, à l'adresse <https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/organiser-demarche-environnementale/dossier/ecoconcevoir-produits/enjeux-lecoconception-benefices-lentreprise-leconomie-lenvironnement>
- [52] Pierre-Yves Berthelemy. (2020, 13 février). L'écoconception : quels avantages ? Atlantic. Consulté 3 juillet 2020, à l'adresse <https://ma-maison-eco-confort.atlantic.fr/lecoconception-quels-avantages/>

- [53] Organisation internationale de normalisation. (2002). ISO/TR 14062 : 2002(fr) Management environnemental — Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. Consulté 3 juillet 2020, à l'adresse <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:tr:14062:ed-1:v1:fr>
- [54] Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable. (2015). Calcul d'indicateurs de flux de matières en Wallonie en vue de préparer le prochain tableau de l'environnement wallon (Rapport Final). Consulté à l'adresse http://etat.environnement.wallonie.be/files/Studies/Rapport_Analyse_Flux_de_mati%C3%A8res_-_2015_.pdf
- [55] Service de Paléontologie Animale et Humaine. (2014). Mines et Exploitations des Minerais en Wallonie. Université de Liège. Consulté le 18 avril 2020, à l'adresse <https://sites.google.com/site/paleocoralslg/recherches/geolreg/mines>
- [56] Etopia. (2017, juillet 10). Le retour des mines en Europe, une réalité ? Consulté le 20 avril 2020, à l'adresse <https://etopia.be/le-retour-des-mines-en-europe-une-realite/>
- [57] Commission européenne. (2017). Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE (COM(2017) 490 final). Consulté à l'adresse <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/FR/COM-2017-490-F1-FR-MAIN-PART-1.PDF>
- [58] Éric Marcoux . (2017). Les mines métalliques en Europe en 2017. Consulté le 13 mai 2020, à l'adresse https://www.lasim.org/images/divers/2017/marcoux_osuc.pdf
- [59] Union européenne. (2011). Document d'orientation de la Commission européenne sur la mise en œuvre de nouvelles activités extractives non énergétiques conformément aux critères Natura 2000, p. 4. Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne. <https://doi.org/10.2779/39789>
- [60] Réseau Natura 2000. (2015, 14 octobre). Commission européenne Environnement. Consulté 24 juillet 2020, à l'adresse https://ec.europa.eu/environment/basics/natural-capital/natura2000/index_fr.htm
- [61] Dominique Berns, D. B. (2018, avril 13). Pour vivre propre, il faut des métaux sales. Consulté le 18 avril 2020, à l'adresse <https://plus.lesoir.be/150985/article/2018-04-13/pour-vivre-propre-il-faut-des-metaux-sales>
- [62] Laureine Atsatito. (2019, août 22). Exploitation minière et environnement. Belgian Platform on Earth Observation. Consulté le 13 mai 2020, à l'adresse

<https://eo.belspo.be/fr/exploitation-mini%C3%A9re-et-environnement>

- [63] Raf Custers. (2019, septembre 26). Debat over nieuwe mijn : ‘Waarom zink in Colombia gaan halen als het van hier kan komen ? ’. G. Debroux, Trad. Consulté 16 mai 2020, à l’adresse <https://www.mo.be/fr/reportage/une-nouvelle-mine-controvers%C3%A9e-pourquoi-aller-chercher-du-zinc-en-colombie-si-l-peut-se-le>
- [64] Office National de Sécurité Sociale. (2020, 5 mars). Répartition des postes de travail par lieu de travail | RSZ - ONSS - LSS - NSSO. Classeur localunit_VAL_FR_20184.xlsx, tableau 7. Consulté 4 juillet 2020, à l’adresse <https://rsz.fgov.be/fr/statistiques/publications/repartition-des-postes-de-travail-par-lieu-de-travail>
- [65] Paul Manuel Godoy Hilario. (2019, 18 juin). Fabricants d’ordinateurs et périphériques en Belgique 2008-2017. Statista. Consulté 24 juin 2020, à l’adresse <https://fr.statista.com/statistiques/656641/entreprises-fabrication-ordinateurs-peripheriques-belgique/>
- [66] FPS Economy, S.M.E., Self Employed and Energy. (2019, octobre). Belgium at a glance. In Belgium’s economy in a nutshell - Economic outlook of October 2019. p. 5-6. Consulté à l’adresse <https://economie.fgov.be/en/publication/belgiums-economy-nutshell>
- [67] SPF Economie. (2019, 4 décembre). Les TIC en Belgique. Consulté 25 juin 2020, à l’adresse <https://economie.fgov.be/fr/themes/line/les-tic-en-Belgique>
- [68] Belgium Exports of Electrical, electronic equipment - 1995-2019 Data | 2020 Forecast. (2020, juin). Consulté le 3 juin 2020, à l’adresse <https://tradingeconomics.com/belgium/exports/electrical-electronic-equipment>
- [69] Workman, D. (2020, mars 21). Belgium’s Top 10 Exports. Consulté le 3 juin 2020, à l’adresse <http://www.worldstopexports.com/belgiums-top-exports/>
- [70] Impact environnemental du numérique. (s. d.). In Wikipédia. Consulté 14 juin 2020, à l’adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_%C3%A9nvironnemental_du_num%C3%A9rique
- [71] UCM. (s. d.). Eco-conception. Consulté 18 juin 2020, à l’adresse <https://www.ucm.be/Environnement/Accompagnements/Eco-conception>
- [72] SPF Santé Publique. (2016, 9 février). Équipements électriques et électroniques : la législation RoHS et DEEE. Consulté 18 juin 2020, à l’adresse <https://www.health.belgium.be/fr/environnement/mise-sur-le-marche-des-produits/equipements-electriques-et-electroniques-la>

- [73] SPF Economie. (2016). Ensemble, faisons tourner l'économie en développant l'économie circulaire en Belgique. p. 10-11. Consulté à l'adresse <https://www.marghem.be/wp-content/uploads/ECON-CIRC-FR-LIGHT-2.pdf>
- [74] Agence Science-Presse. (2019, 22 juillet). Le transport maritime est moins polluant ? 4 choses à savoir. Consulté 11 juin 2020, à l'adresse <https://www.sciencepresse.qc.ca/actualite/detecteur-rumeurs/2019/07/22/transport-maritime-moins-polluant-4-choses-savoir>
- [75] EcoCO2. (2010, 12 avril). Le retour du transport fluvial. Consulté 11 juin 2020, à l'adresse <https://www.ecoco2.com/blog/le-retour-du-transport-fluvial/>
- [76] Service public fédéral Mobilité et Transports. (2016). Chiffres clés de la mobilité 2016. p. 5. Consulté à l'adresse https://mobilit.belgium.be/sites/default/files/chiffres_cles_mobilite_2016.pdf
- [77] Dumoulin, M. (2019, 12 juillet). Trains de marchandise : ils ont moins roulé, mais ont plus transporté. Consulté 13 juin 2020, à l'adresse https://www.rtb.be/info/economie/detail_pourquoi-les-trains-de-marchandise-ont-moins-roule-en-2018?id=10269536
- [78] Vangulick, T. (2018, 25 janvier). Le transport fluvial en hausse en Wallonie. Consulté 13 juin 2020, à l'adresse https://www.rtb.be/info/societe/detail_le-transport-fluvial-en-hausse-en-wallonie?id=9821919
- [79] Recupel. (2018). Rapport Annuel 2018 La richesse de l'e-waste . Consulté à l'adresse <http://jaarverslag.recupel.be/index-fr.html>
- [80] Weight per capita of EEE. (s.d.). Urban Mine Platform. Consulté 24 juillet 2020, à l'adresse <http://www.urbanmineplatform.eu/urbanmine/eee/weightpercapita>
- [81] Kemp, S. (2020, 17 février). Digital 2020 : Belgium. We Are Social Inc. Consulté 24 juin 2020, à l'adresse <https://datareportal.com/reports/digital-2020-belgium>
- [82] Claude WILLEMS. (2019, 20 juin). Réflexions à propos des Data Centers. Wallonica. Consulté 25 juin 2020, à l'adresse <https://wallonica.org/blog/2019/05/29/willems-reflexions-a-propos-des-data-centers/>
- [83] Ecoconso. (2019, 1 septembre). Diminuer l'impact du numérique sur le climat. Consulté 26 juin 2020, à l'adresse <https://www.ecoconso.be/fr/content/diminuer-limpact-du-numerique-sur-le-climat>
- [84] Lore Thouvenin. (2019, 15 février). Le nouvel enjeu de la pollution digitale. L'Echo. Consulté 27 juin 2020, à l'adresse

- <https://www.lecho.be/dossier/climat/le-nouvel-enjeu-de-la-pollution-digitale/10098170.html>
- [85] L.V. (2019, 19 septembre). La pollution numérique, source de 4% des émissions annuelles de CO2. RTBF. Consulté 27 juin 2020, à l'adresse https://www.rtb.be/info/medias/detail_la-pollution-numerique-source-de-4-des-emissions-annuelles-de-co2?id=10319678
 - [86] Service Public de Wallonie. (2019). L'empreinte du numérique : une hausse inédite. Consulté 29 juin 2020, à l'adresse <http://developpementdurable.wallonie.be/actualite/lempreinte-du-numerique-une-hausse-inedite>
 - [87] Service Public de Wallonie. (s. d.). Développement Durable. Consulté 29 juin 2020, aux adresses <http://developpementdurable.wallonie.be/>, http://developpementdurable.wallonie.be/sites/default/files/user__uploads/Les%20impacts%20du%20num%C3%A9rique.pdf
 - [88] UCM., & Wallonie. (s. d.). Green IT Diminuer l'impact énergétique de l'informatique en entreprise. Consulté 24 juin 2020, à l'adresse <https://www.ucm.be/Environnement/Outils-et-documents-utiles/Documentation/Brochures-et-guides-pratiques/Green-IT-un-outil-precieux>
 - [89] CIRB, & Région de Bruxelles-Capitale. (2019). Livre Blanc concernant les enjeux de la transformation numérique au service des citoyens (2019/24). p. 20-21. Consulté à l'adresse <https://cirb.brussels/fr/quoi-de-neuf/publications/livres-blancs/livre-blanc-2019-2024-les-enjeux-de-la-transformation-numerique-au-service-des-citoyens>
 - [90] Bruxelles environnement. (2018). Label Entreprise Ecodynamique - Bonnes pratiques. Consulté 29 juin 2020, à l'adresse <https://www.ecodyn.brussels/le-label/bonnes-pratiques/>
 - [91] Philippe Muyters, Vlaams minister van Werk, Economie, Innovatie en Sport. (2017, 24 février). 'Vlaanderen circulair' Een stuwende kracht naar een circulaire economie in Vlaanderen. Consulté 29 juin 2020, à l'adresse <https://www.vlaanderen.be/publicaties/transitieprioriteit-de-transitie-naar-de-circulaire-economie-doorzetten-vlaanderen-circulair-startnota>
 - [92] FFact Management Consultants. (2013, mars). (W)EEE Mass balance and market structure in Belgium - Final report Commissioned by Recupel. Delft, The Netherlands. Consulté 14 juillet 2020, à l'adresse <https://i.unu.edu/media/unu.edu/news/39523/Recupel-Report-FINAL.pdf>
 - [93] Deloitte Consulting & Advisory CVBA. (2018, 23 février). (W)EEE 2016 Mass balance and market structure in Belgium - Final report Commissioned by

Recupel.

- [94] Rapport du Parlement Wallon. (Période 2016-2017). Exécution des conventions environnementales relatives à l'obligation de reprise de certains déchets – Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). p. 3. Consulté 14 juillet 2020, à l'adresse http://environnement.wallonie.be/rapports/owd/dechets_menagers/rapport-deee-2016-2017.pdf
- [95] Recycler l'électro pour un monde plus beau. (s. d.). Recupel. Consulté 17 juillet 2020, à l'adresse <https://www.recupel.be/>
- [96] Recupel. (s. d.). Pour les professionnels. Consulté 17 juillet 2020, à l'adresse <https://www.recupel.be/fr/pour-les-professionnels/#>
- [97] À propos de nous. (2020, 4 mai). Beweee. Consulté 5 août 2020, à l'adresse <https://beweee.be/fr/a-propos-de-nous>
- [98] Recupel. (2018, 28 mars). La Belgique n'atteint pas encore les objectifs européens en matière de collecte des électro. Consulté 21 juillet 2020, à l'adresse <https://recupel.prezly.com/la-Belgique-natteint-pas-encore-les-objectifs-europeens-en-matiere-de-collecte-des-electro#>
- [99] Bruxelles Environnement. (2020, 13 mai). Régime de traçabilité pour la gestion des déchets non-ménagers. Consulté 14 juillet 2020, à l'adresse <https://environnement.brussels/thematiques/dechets-ressources/vos-obligations/regime-de-tracabilite-pour-la-gestion-des-dechets-non>
- [100] OVAM. (s. d.). Veelgestelde vragen over het registreren en rapporteren van afvalstoffen en materialen. Consulté 14 juillet 2020, à l'adresse <https://ovam.be/veelgestelde-vragen-over-het-registreren-en-rapporteren-van-afvalstoffen-en-materialen#afvalstoffenregwelke>
- [101] Bebat Portal. (s. d.). Entreprises établies en Belgique. Consulté 14 juillet 2020, à l'adresse <https://mybatbase.bebat.be/fr/faq/faq-affilier/faq-affilierentreprisesBelges/>
- [102] Recupel. (s. d.). Résultats de traitement. Consulté 21 juillet 2020, à l'adresse <https://rapportannuel.recupel.be/resultats-de-traitement-fr/#tabs>

7 Annexes

A.1 Détails des critères de recherches dans les bases de données d'articles scientifiques

arXiv

	belgium OR wallonia OR flanders 605 results	All fields
	"e-waste" OR ewaste OR "electronic waste" OR weee 8 results	All fields
AND	belgium OR wallonia OR flanders OR brussels "e-waste" OR ewaste OR "electronic waste" OR weee Sorry, your query returned no results	All fields All fields
AND	belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles déchets d'équipements électriques et électroniques OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E Sorry, your query returned no results	All fields All fields

ASCE

Anywhere	"e-waste" OR ewaste OR "electronic waste" OR weee 23967
Anywhere	belgium OR flanders OR wallonia 1745
Anywhere	("e-waste" OR ewaste OR "electronic waste" OR weee) AND (belgium OR flanders OR wallonia OR brussels) 5
Anywhere	("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flandre OR wallonie OR bruxelles) 0

Association for Computing

belgium OR flanders OR wallonia
3322
"e-waste" OR ewaste OR "electronic waste" OR weee
110
(belgium OR flanders OR wallonia OR brussels) AND (ewaste OR "e-waste" OR "electronic waste" OR WEEE)
No results found for “(belgium OR flanders OR wallonia OR brussels) AND (ewaste OR "e-waste" OR "electronic waste" OR WEEE)”
("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles)
No results found for “("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles)”

DeepDyve

(belgium OR flanders OR wallonia OR Brussels) AND (ewaste OR "e-waste" OR "electronic waste" OR WEEE)
26
("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles)
0

DBLP

("e-waste" ewaste "electronic waste" weee) AND (belgium flanders wallonia brussels)
0
("déchets d'équipements électriques et électroniques" " déchets électriques et électroniques" DEEE D3E) AND (belgique flamandre wallonie bruxelles)
0

GoogleScholar

allintitle:((ewaste OR "e-waste" OR "electronic waste" OR WEEE) (belgium OR flanders OR wallonia OR brussels))
5
allintitle:(("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles))
0

IEEE Xplore

("Abstract": "e-waste" OR ewaste OR "electronic waste" OR weee) AND (belgium OR flanders OR wallonia OR brussels)
12
("Abstract": "déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles)
0

Inspec

(ewaste OR "e-waste" OR "electronic waste" OR WEEE) AND (belgium OR flanders OR wallonia OR brussels)
3
("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles)
0

ScienceDirect

Find articles with these terms
Title, abstract or author-specified keywords
(ewaste OR "e-waste" OR "electronic waste" OR WEEE) AND (belgium OR flanders OR wallonia OR brussels)
10
Title, abstract or author-specified keywords
("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles)
1

Scopus

TITLE-ABS-KEY((ewaste OR "e-waste" OR "electronic waste" OR WEEE) AND (belgium OR flanders OR wallonia OR brussels))
20
TITLE-ABS-KEY(("déchets d'équipements électriques et électroniques" OR " déchets électriques et électroniques" OR DEEE OR D3E) AND (belgique OR flamandre OR wallonie OR bruxelles))
0

A.2 Liste des recycleurs agréés Recupel

	Recycleur	Implantation(s)
1	AA IJzerland	Wommelgem
2	ABa Recycling	Ath
3	Alfamet	Dendermonde
4	B.E.E.R.	Willebroek
5	Brussels Recycling Metal - B R. MET	Haren (Bru.)
6	Bst Luxembourg	Arlon
7	Bulmetal	Hoboken
8	Casier Recycling	Deerlijk
		Maldegem
		Kortrijk
9	Ck&Co Transport&Recycling	Wetteren
10	Cogetrina	Blandain
11	Comet Bruxelles	Bruxelles
12	Comet Traitements	Mont-sur-Marchienne
13	Cometsambre	Obourg
		Mont-sur-Marchienne
		Châtelet
14	Coolrec Belgium	Willebroek
15	Coolrec Nederland	Antwerpen
16	CTG Circular	Mechelen
17	Declercq Carlos	Lichtervelde
18	Degels Metal	Ieper
19	Derichebourg Belgium	Aarschot
		Naninne
		Marchienne-au-Pont
		Charleroi
		Ghlin
		Stavelot
		Bruxelles
		Eupen
		Bressoux
20	Dhondt Recycling	Tielt
21	Dubail Recycling	Beez
22	Ecofer	Tournai
23	Gagelmans Recycling	Rijkevorsel
		Wijnegem

	Recycleur	Implantation(s)
24	Galloo	Gavere
		Brugge
		Dendermonde
		Menen
		Koekelare
		Menen
25	Galloo Tertre	Tertre
26	Galloo Wallonie	Kain
		Ghislenghien
		Châtelet
27	H&C Depla & Cie	Meulebeke
28	Harzé J.-Van Est	Herentals
29	Hensmans	Lot
30	HKS Belgium	Geel
31	Huughe Metalen	Gent
32	Indaver	Grimbergen
		Kallo (Kieldrecht)
		Antwerpen
33	Indaver Relight	Kallo (Kieldrecht)
		Antwerpen
		Doel
34	Ivo Van Den Bosch	Ranst
35	Martens	Bellem
36	MCR	Schelle
37	Metaalhandel Werrens	Balen
38	Metaalhandel Wynants En Zonen	Sint-Katelijne-Waver
39	MIREC	Sint-Niklaas
40	Nieulandt Recycling	Aalst
41	Out Of Use	Beringen
42	Recyca	Malle
43	Recydel	Wandre
44	Recymet	Châtelet
45	Rocourt Metaux	Liège
46	RSB - Recycling System Box	Amancy
47	Rumstse Metaalhandel	Rumst
48	Sametal	Bressoux
49	Seos Noirfalise Recycling	Verviers
50	Stassen Recycling	Genk

	Recycleur	Implantation(s)
51	SUEZ R&R BE Services	Neder-over-Heembeek (Bru.)
		Beerse
		Antwerpen
		Bruxelles
52	SUEZ R&R BE Wallonie	Jumet
		Sombreffe
54	Trans Recycling Wirtz	Sombreffe
55	Transmetaux	Jumet
56	Transmosca	Ressaix
57	Van Hoef Willem	Dilsen-Stokkem
58	Vanheede Environmental Services	Roeselare
		Antwerpen
59	Vanhees Metalen	Lommel
60	Veolia Es MRC	Antwerpen
61	Waasland Recycling	Sint-Gillis-Waas
62	Willems - Recuperatiebedrijf	Gistel
63	Wilmet	Malonne